

Том 25, № 06, 2022

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 25, No. 06, 2022

Издается с 1998 г.

Москва
2022

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, проф., д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д. т. н., первый заместитель генерального директора национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Боев С.Ф., проф., д. т. н., д. э. н., генеральный директор Межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хуан, Китай;

Франческа де Кресченцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, Транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиации, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Editorial Board

- Editor-in-Chief:** *Boris P. Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-Chief:** *Vadim V. Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana V. Naumova*, Associate Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina O. Poleshkina, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Chief Editorial Board:

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Vacily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vympel", Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Němec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акиншин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президиуме РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Вышинский В.В., проф., д. т. н., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф.-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф.-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф.-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татаринов В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guzyi, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Alexandr V. Poltavsky, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Акимов А.Н., Волошин В.А., Супряга А.А.

Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) 8

Горбунов В.П., Самойленко В.М., Кузнецов С.В., Стручкова А.М.

Анализ применимости корреляционно-регрессионных моделей для оценки факторов поставки авиатоплива в труднодоступные арктические районы Крайнего Севера 23

Егошин С.Ф., Смирнов А.В.

Обоснование рациональных требований к самолетам местных воздушных линий России на основе моделирования авиатранспортной системы с учетом перспективных критериев эффективности 40

Самойленко В.М., Пашенко Г.Т., Самойленко Е.В., Шестаков В.В.

Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом ... 53

Шаров В.Д., Кузнецов В.Л., Поляков П.М.

К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем 62

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Журавский К.А., Костин П.С.

Определение основных характеристик пространственного маневра переворот самолета с ограничителем предельных режимов 77

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Akimov A.N., Voloshin V.C., Supryaga A.A.

Algorithmic support of the adaptive system of controlled flight into terrain avoidance (CFITA) 8

Gorbunov V.P., Samoylenko V.M., Kuznetsov S.V., Struchkova A.M.

Analysis of the applicability of correlation and regression models to assess the factors of aviation fuel supply to the remote Arctic regions of the Far North 23

Egoshin S.F., Smirnov A.V.

Justification of rational requirements for aircraft of Russian regional aviation based on modeling of the air transport system considering perspective efficiency criteria 40

Samoylenko V.M., Paschenko G.T., Samoylenko E.V., Shestakov, V.V.

The effect of suspension parameters on the properties of the coating obtained by the slip method 53

Sharov V.D., Kuznetsov V.L., Polyakov P.M.

To the risk management methodology of unmanned aircraft systems operators 62

MECHANICAL ENGINEERING

Zhuravsky K.A., Kostin P.S.

Determination of main performance data of an aircraft three-dimensional maneuver split-S with a permissible flight envelope limiter 77

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

**2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны,
ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
2.9.6. – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники**

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22

**Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы
предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР)**

А.Н. Акимов¹, В.А. Волошин¹, А.А. Супрыга¹

¹*Объединенная авиастроительная корпорация, г. Москва, Россия*

Аннотация: В работе рассматриваются алгоритмы ограничений траекторных параметров движения самолетов. Рассматриваются три группы алгоритмов. Они различаются по объему бортовых баз данных о земной поверхности, о режимах применения самолетов. Первая группа (полный режим АСПСР) использует максимальную цифровую картографическую информацию (ЦКИ) о рельефе. В алгоритмах АСПСР рельеф аппроксимируется в виде плоскостей в пространстве в некоторой прогнозируемой, упрежденной области в направлении полета. Увод от препятствия осуществляется в пространстве в заданном направлении. Формируется уравнение близлежащей плоскости, вычисляется расстояние, темп приближения и время достижения плоскости. Вычисляется располагаемое ускорение сброса темпа приближения к плоскости ограничения при заданных управлениях на ограничение. Вычисляется потребное время для сброса темпа приближения к препятствию до нуля. Приравняв выражения для времен достижения и потребного, осуществляется переход к расстоянию до плоскости ограничения, на котором необходимо реализовать управления, выделенные на ограничение. Вторая группа (основной режим АСПСР) использует ЦКИ о рельефе в направлении линии пути в упрежденной области. Рельеф аппроксимируется линией в плоскости. В качестве управления используется заданная нормальная перегрузка. Увод от препятствия осуществляется в вертикальной или наклонной плоскостях. Далее используются те же процедуры, что и в первой группе. Третья группа (минимальный режим АСПСР) не использует ЦКИ. В качестве информационных систем о рельефе используются радио- и барометрические высотомеры. Данный режим АСПСР используется только для полетов в равнинной местности. В алгоритме используются те же процедуры, что в первой и второй группах. Приведен аналитический анализ, подтверждающий адаптивные свойства алгоритмического обеспечения, базирующийся на фундаментальном законе равнопеременного движения. Эффективность рассмотренных алгоритмов подтверждена обширным объемом моделирования. Представленные алгоритмы могут быть базовой основой для создания российских аналогов TAWS.

Ключевые слова: динамика полета, алгоритмы, адаптивность, системы ограничений, закон равнозамедленного движения.

Для цитирования: Акимов А.Н., Волошин В.А., Супрыга А.А. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22

**Algorithmic support of the adaptive system of controlled flight into
terrain avoidance (CFITA)**

A.N. Akimov¹, V.A. Voloshin¹, A.A. Supryaga¹

¹*United Aircraft Building Company, Moscow, Russia*

Abstract: The article considers the restrictions algorithms for the trajectory parameters of aircraft motion. Three groups of algorithms are under consideration. They are distinguished by the volume of airborne database about terrain, modes of aircraft

operation. The first group (the full SFITA mode) uses the maximum digital cartographic information (DCI) about the terrain. In the SFITA algorithms, the terrain is approximated in the form of planes in space in some predictable, pre-emptive area in the flight path direction. Terrain following is carried out in space in the assigned direction. The equation of the adjacent plane is solved. The distance, the approach speed, and the time to reach the plane are enumerated. The net acceleration to reduce the approach speed to the plane of restriction is calculated under the specified constraint controls. The required time is calculated to reduce the approach speed towards the obstacle to zero. Having equated the expressions for the time of reaching and the required time, transition towards the distance to the plane of restriction, on which it is imperative to utilize constraint controls. The second group (the major SFITA mode) uses the DCI about the terrain in the direction of track in a pre-emptive area. The terrain is approximated by a line in the plane. The specified normal overload is used as a means of control. Terrain following is conducted in the vertical or slant planes. Subsequently, the same procedures are used as in the first group. The third group (the minimum SFITA mode) does not use DCI. The radio and barometric pressure altimeters are used as information systems about the terrain. The given SFITA mode is selected only for flights in a flat terrain. The algorithm includes the similar procedures as in the first and in the second groups. The analytical analysis, confirming the adaptive properties of algorithmic support based on the fundamental law of uniformly retarded motion, is given. The considered algorithms efficiency is confirmed by a comprehensive amount of simulation. The presented algorithms can become the foundation for developing Russian TAWS analogues.

Key words: flight dynamics, algorithms, adaptivity, systems of constraints, law of uniformly retarded motion.

For citation: Akimov, A.N., Voloshin, V.C. & Supryaga, A.A. (2022). Algorithmic support of the adaptive system of controlled flight into terrain avoidance (CFITA). Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22

Введение

Для предупреждения столкновения с рельефом местности на самолетах гражданской авиации устанавливаются специальные системы раннего предупреждения близости земли типа TAWS (Terrain Awareness and Warning System). В военной авиации используется режим «Увод с опасной высоты» системы автоматического управления (САУ), а также системы предотвращения столкновения с рельефом. Однако первые являются пассивными устройствами, обеспечивающими лишь информирование экипажа о недопустимом приближении к земле, а вторые реализуют эвристические логики и алгоритмы, недостаточно учитывающие динамику приближения ЛА к ограничениям, конфигурацию самих ограничений, неприспособленность к выдерживанию ограничений 3-D, отсутствие адаптивных свойств (показано ниже).

Весьма сложный вид ограничения приобретают при пилотировании на малых высотах или в гористой местности, когда отдельные высоты подстилающего рельефа местности превышают (или близки по высоте) геометрическую высоту полета. При этом подлет к ним возможен с разных направлений, что фактически изменяет углы уклона препятствий. Пилотирование в этих условиях долж-

но гарантировать реализацию такой траектории полета, которая нигде не пересекается с рельефом местности. В то же время система не должна допускать преждевременное срабатывание, увеличивая высоту полета. Во многих случаях это неприемлемо, особенно в военной авиации. При этом располагаемые ресурсы систем управления должны быть гарантированно достаточны для предотвращения столкновения с препятствием, реализуя заранее выделенные управления на решение задачи.

Наиболее значительный вклад в разработку теоретических основ систем ограничения внесли доктора технических наук, профессора В.Н. Буков, А.Н. Акимов, В.В. Воробьев в своих диссертационных работах и их научные школы [1–17]. Предпосылкой для развития рассматриваемого подхода послужили фрагменты метода прямой оптимизации [3], получившие впоследствии фундаментальную проработку в докторской диссертации В.В. Воробьева. В то же время опубликованные работы имели недостаточную инженерную направленность, что послужило препятствием для их практического внедрения в комплексы бортового оборудования.

В данной работе сделан уклон в сторону практической направленности здесь и ранее полученных результатов.

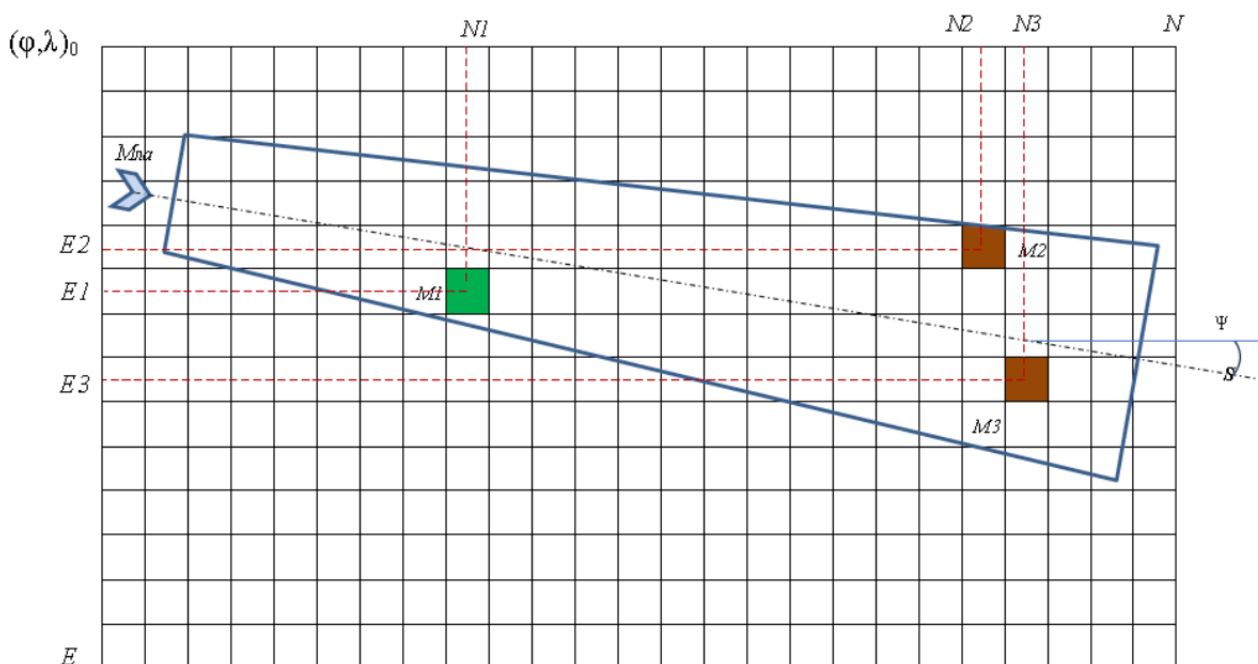


Рис. 1. Система координат АСПСР для полного режима
Fig. 1. SFITA coordinate system for the full mode

Системы координат и плоскость ограничения

Предполагается, что АСПСР имеет базу данных рельефа аналогично TAWS, но назначение системы не только предупреждение экипажа, но и автоматическое предотвращение столкновения с рельефом.

Решение задачи предотвращения столкновения осуществляется в системе координат ENH¹ [18].

Из текущего фрагмента $(\varphi, \lambda)_0$ базы данных в упрежденной зоне выдаются линейные координаты ЛА $M_{ЛА}$ и характерных точек препятствия $M_1(E_1; N_1; H_1)$, $M_2(E_2; N_2; H_2)$,

$M_3(E_3; N_3; H_3)$, схематически представленные на рис. 1.

Принимается, что точка M_1 соответствует минимальной высоте препятствия в упрежденной зоне. Точки M_2 и M_3 соответствуют максимальным высотам препятствия слева и справа относительно линии пути в упрежденной зоне. Данные точки находятся последовательным перебором точек от ближней границы упрежденной зоны к дальней, отдельно для левой и правой ее частей относительно линии пути.

Формируется уравнение плоскости, проходящей через три выбранные точки [19].

Запишем уравнение плоскости в форме определителя 3-го порядка. Оно будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} E - E_1 & N - N_1 & H - H_1 \\ E_2 - E_1 & N_2 - N_1 & H_2 - H_1 \\ E_3 - E_1 & N_3 - N_1 & H_3 - H_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

¹ ГОСТ 32453-2017. Методы преобразования координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2017. 19 с.

Раскрыв последовательно данный определитель по элементам первой строки и соответствующие определители 2-го порядка, получим общее уравнение плоскости ограничения K

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1 \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} - b_1 \begin{vmatrix} a_2 & c_2 \\ a_3 & c_3 \end{vmatrix} + c_1 \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} = 0;$$

$$a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - b_1(a_2c_3 - a_3c_2) + c_1(a_2b_3 - a_3b_2) = a_1e - b_1n + c_1h = 0;$$

$$AE + BN + CH + D = 0,$$

где a_1, b_1, c_1 – обозначения в (1), получим

$$A = e, \quad B = -n, \quad C = h, \quad D = -E_1e + N_1n - H_1h.$$

Уравнение границы запишем в общем виде

$$ax + D = 0, \quad (3)$$

где здесь и далее $a = [A \ B \ C]$, $x^T = [E \ N \ H]$.

Выражения (1)–(3) являются базовыми для рассматриваемых ниже алгоритмов. Такой подход к описанию рельефа достаточно прост и в то же время экономичен по потребным ресурсам памяти бортовых баз данных. Но самое главное заключается в том, что он позволяет методически строго, на основе методов аналитической геометрии подходить к решению задачи предотвращения столкновения с рельефом.

Формирование алгоритма полного режима АСПСР

Составным элементом алгоритма работы АСПСР является выражение для вычисления расстояния $d(t)$ между текущей точкой положения ЛА $M_{ЛА}(E(t), N(t), H(t))$ в выбранной системе координат (СК) и плоскостью ограничения K [18]

$$d(t) = \frac{|AE(t) + BN(t) + CH(t) + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (4)$$

или в общем виде

$$d = \bar{a}x + \bar{d}. \quad (5)$$

Выражение для его производной имеет вид (здесь и ниже опущены аргумент t и знак модуля)

$$\dot{d} = \frac{A\dot{E} + B\dot{N} + C\dot{H}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = \frac{AV_E + BV_N + CV_H}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (6)$$

в общем виде

$$\dot{d} = \bar{a}\dot{x}. \quad (7)$$

Здесь проекции вектора скорости вычисляются в бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС). При моделировании темп изменения расстояния $\dot{d}$ может быть получен из (6) численным дифференцированием методом левосторонней разности [19] либо с использованием выражения (16) при совпадающей ориентации осей ENH с осями нормальной земной системы координат.

Зная значения расстояния и его производной и учитывая, что на плоскости ограничения темп приближения к ней должен быть полностью погашен АСПСР, то есть $\dot{d} = 0$, находим время ее достижения при срабатывании АСПСР.

Задавшись условием, что

$$\dot{d}|_{d=0} = 0, \quad (8)$$

и сделав допущение о линейности сброса скорости от текущего значения $\dot{d}$ до нуля, обеспечив $\ddot{d} = const$:

$$t_d = \frac{0 - d(t)}{\dot{d}_{cp}} = -\frac{d(t)}{\dot{d}_{cp}}, \text{ где } \dot{d}_{cp} = \frac{\dot{d} + 0}{2} = \frac{\dot{d}}{2}, \quad (9)$$

окончательное выражение для времени достижения препятствия имеет вид

$$t_d(t) = -\frac{2d(t)}{\dot{d}}. \quad (10)$$

По аналогии с выражением (10) в пространстве производных более высокого порядка потребное время t_n для сброса темпа приближения к ограничению при выделенном управлении определяется выражением

$$t_n = \frac{0 - \dot{d}}{\ddot{d}_p} = -\frac{\dot{d}}{\ddot{d}_p}. \quad (11)$$

Здесь $\ddot{d}_p$ – располагаемое ускорение сброса темпа приближения к плоскости ограничения под действием управления ограничения. В выражениях (10), (11)

$$d \geq 0, \quad \dot{d} \leq 0, \quad \ddot{d}_p \geq 0.$$

Выражения (10) и (11) являются основополагающими для рассматриваемых в статье алгоритмов.

Выражение для располагаемого ускорения имеет вид

$$\ddot{d}_p = \frac{A\dot{V}_{Ep} + B\dot{V}_{Np} + C\dot{V}_{Hp}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (12)$$

или в общем виде

$$\ddot{d}_p = \bar{a} \cdot \ddot{x}_p.$$

Приравняв уравнения (10) и (11) и разрешив их относительно дальности d , которую обозначим как $d_{огр}$, получим зависимость для определения расстояния до поверхности ограничения $d_{огр}$, при достижении которого необходимо включать управление ограничения. Пропедев соответствующие преобразования, имеем

$$d_{огр} = \frac{\dot{d}^2}{2\ddot{d}_p} \text{ при } t_d(t) = t_n. \quad (13)$$

В итоге для АСПСР имеем следующий алгоритм ее срабатывания:

$$u = \begin{cases} u(t), & \text{если } d > d_{огр}; \\ u_p + \Delta u(t), & \text{если } d \leq d_{огр}. \end{cases} \quad (14)$$

В (14) u_p имеет смысл предварительно выбранного управляющего воздействия, доверенного АСПСР, а $\Delta u(t)$ обеспечивает текущую подстройку алгоритма для выполнения условия

$$\ddot{d}_p = \frac{A\dot{V}_{Ep} + B\dot{V}_{Np} + C\dot{V}_{Hp}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = const. \quad (15)$$

Это условие является принципиальным, поскольку сводит решение задачи к использованию фундаментального закона равнопеременного (равнозамедленного) движения. По мнению авторов [5], это первое решение задачи выдерживания ограничений в динамических системах, свободное от недостатков эвристических подходов и сложных настроек коэффициентов функции штрафа функционала и длительности прогноза [1, 2].

Вычисление располагаемого ускорения увода от препятствия

Для вычисления $\ddot{d}_p$ осуществляется условный переход от ENH к нормальной зем-

ной СК, кинематические уравнения движения имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{X}_g &= V_\kappa \cos \theta \cos \Psi; \\ \dot{H}_g &= V_\kappa \sin \theta; \\ \dot{Z}_g &= -V_\kappa \cos \theta \sin \Psi\end{aligned}\quad (16)$$

в общем виде

$$\dot{x} = f(w), \text{ где } w^T = [V_\kappa \quad \theta \quad \Psi].$$

Здесь и ниже все обозначения стандартные и соответствуют ГОСТу². Направления осей соответствуют системе координат (СК) ЕНН: ось X_g направлена на восток, ось Z_g направлена на север, ось H в геодезический зенит (по вектору силы притяжения).

Уравнения динамики движения имеют вид

$$\ddot{x}_p(t) = \begin{bmatrix} \ddot{X}_{gp} = -V_\kappa \sin \theta \cos \Psi \cdot \dot{\theta}_p - V_\kappa \cos \theta \sin \Psi \cdot \dot{\Psi}_p \\ \ddot{Z}_{gp} = V_\kappa \sin \theta \sin \Psi \cdot \dot{\theta}_p - V_\kappa \cos \theta \cos \Psi \cdot \dot{\Psi}_p \\ \ddot{H}_{gp} = V_\kappa \cos \theta \cdot \dot{\theta}_p \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Заменяя в (15) обозначения проекций ускорения на используемые в (18), получим

$$\ddot{d}_p = \frac{A\ddot{X}_{gp} + B\ddot{Z}_{gp} + C\ddot{H}_{gp}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, u = u_{огр}, \quad (19)$$

где $u_{огр} \in (n_{xa}, n_{ya}, \gamma_a)_{огр}$.

$$A_{cg}^n = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ -\cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \\ \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Принимается, что для рассматриваемой задачи угол рысканья ψ – это курс ЛА.

Вектор ускорения в нормальной СК соот-

$$\dot{V}_\kappa = g(n_{xa} - \sin \theta);$$

$$\dot{\theta} = \frac{g}{V_\kappa} (n_{ya} \cos \gamma_a - n_{za} \sin \gamma_a - \cos \theta); \quad (17)$$

$$\dot{\Psi} = -\frac{g}{V_\kappa \cos \theta} (n_{ya} \sin \gamma_a + n_{za} \cos \gamma_a).$$

В общем виде $\dot{w} = \xi(w, u)$, где $u^T = [n_{xa} \quad n_{ya} \quad \gamma_a]_p$.

Здесь Ψ – путевой угол между проекцией вектора скорости на горизонтальную плоскость и осью Z_g , за него для данной задачи принимается курс ЛА.

Для получения выражений для ускорений по осям нормальной системы координат необходимо продифференцировать (16) по времени и подставить в полученные выражения (17). Вводится допущение, что при срабатывании обеспечивается постоянство скорости. Индекс «р» обозначает, что в данных выражениях присутствуют располагаемые управления

При бортовой реализации для вычисления компенсационного управления необходим пересчет измеряемых в БИНС текущих ускорений в связанной СК в нормальную и сравнение их с располагаемыми. Матрица перехода имеет вид

ветствует выражению

$$f(\cdot) = \begin{bmatrix} \ddot{X}_g \\ \ddot{Z}_g \\ \ddot{H}_g \end{bmatrix} = A_{cg}^n \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \\ a_y \end{bmatrix}, \quad (21)$$

² ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. 51 с.

где $a_{x,z,y}$ – соответствующие проекции ускорения на оси связанной СК, поступающие из БИНС.

При моделировании для вычисления компенсационного управления надо формально продифференцировать (18) как сложные функции по вектору управления $u_p \in (n_{xa}, n_{ya}, \gamma_a)_p$.

Полученная матрица обращается (псевдо-обращается), и находятся компенсационные управления. Выражение для компенсационного управления имеет вид

$$\Delta u(t) = \left(\frac{\partial f}{\partial u^T} \right)^{\#} (f(t) - f_p^{y60d}), \quad (22)$$

где $\frac{\partial f}{\partial u^T} = \frac{\partial f}{\partial w^T} \frac{\partial \xi}{\partial u^T}$ – матрица (3×3) , получаемая из (16, 17).

Здесь знак # соответствует операции обращения или псевдообращения неквадратных и вырожденных матриц [20];

$f(t)$ текущие и f_p^{y60d} фиксированные после включения увода значения производных, вычисляемых при моделировании по (18).

При бортовой реализации в (22) вместо $f(\cdot)$ используются текущие значения ускорений $a_{x,z,y}$, пересчитываемые по (21).

Если принять допущения, что приближение к препятствию осуществляется без крена, либо в момент включения увода он устраняется, то выражение (18) примет вид

$$\begin{aligned} \ddot{X}_g &= -V_{\kappa} \sin \theta \cos \Psi \cdot \dot{\theta}; \\ \ddot{Z}_g &= V_{\kappa} \sin \theta \sin \Psi \cdot \dot{\theta}; \\ \ddot{H}_g &= V_{\kappa} \cos \theta \cdot \dot{\theta}. \end{aligned} \quad (23)$$

Если далее предположить, что в качестве управления принимается только располагаемое значение перегрузки $n_{ya p}$, то (23) может быть преобразовано подстановкой вместо $\dot{\theta}$ выражения $\dot{\theta} = \frac{g}{V_{\kappa}} (n_{ya} - \cos \theta)$:

$$\begin{aligned} \ddot{X}_{gp} &= -g \sin \theta \cos \Psi \cdot (n_{ya p} - \cos \theta); \\ \ddot{Z}_{gp} &= g \sin \theta \sin \Psi \cdot (n_{ya p} - \cos \theta); \\ \ddot{H}_{gp} &= g \cos \theta \cdot (n_{ya p} - \cos \theta). \end{aligned} \quad (24)$$

Тогда в результате формального дифференцирования (24) матрица $\left[\frac{\partial f(\cdot)}{\partial u^T} \right]$ имеет простой вид

$$\left[\frac{\partial f(\cdot)}{\partial n_{ya}} \right] = \begin{bmatrix} \partial \ddot{X}_g / \partial n_{ya} \\ \partial \ddot{Z}_g / \partial n_{ya} \\ \partial \ddot{H}_g / \partial n_{ya} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta \cos \Psi \\ g \sin \theta \sin \Psi \\ g \cos \theta \end{bmatrix} = P, \quad (25)$$

где псевдообратная матрица P вычисляется по алгоритму, рассмотренному в [20].

Также можно использовать метод наименьших квадратов для обращения вырожденных матриц, где формула для вычисления имеет вид

$$P^{\#} = (P^T P)^{-1} P^T, \quad (26)$$

где индекс «Т» означает транспонирование.

Этот случай сводится к уводу от препятствия в вертикальной плоскости, где операция псевдообращения сводится к конечному выражению. Соответствующий алгоритм рассматривается ниже.

Реализация полного режима будет доступна в случае представления в ЦКИ препятствий в виде совокупности плоскостей, их аппроксимирующих.

Основной режим АСПСР

Для получения соответствующих выражений алгоритма АСПСР, когда ограничение положения ЛА в пространстве задано не плоскостью ограничения, а линиями ограничения, образующими максимальные углы уклонов препятствий в направлении полета S (рис. 2). Для этого необходим переход к СК в плоскости «высота – линия пути». При выводе соответствующих зависимостей также ис-

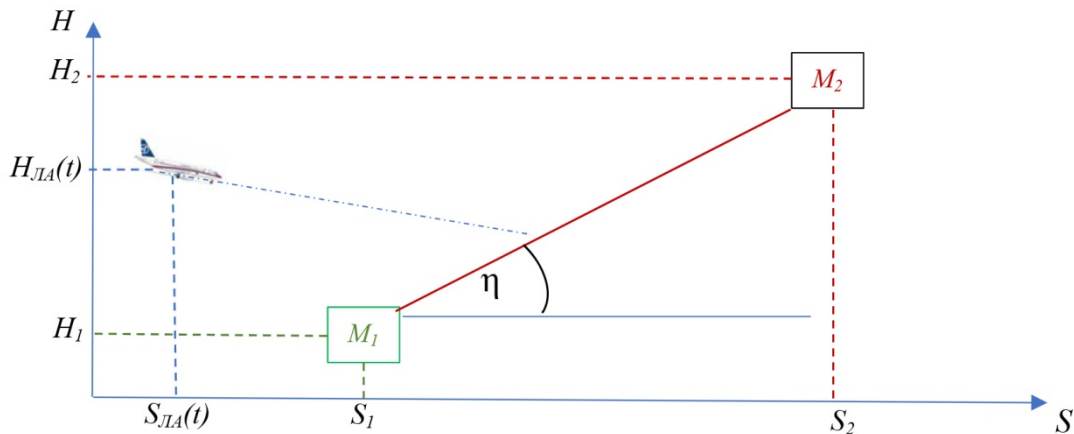


Рис. 2. Система координат основного режима
Fig. 2. The coordinate system of the major mode

пользуются уравнения движения в траекторной СК.

Используя рис. 1 и 2, сформируем уравнение линии ограничения. Для этого выразим координаты S_i через N_i и угол курса Ψ .

$$S_i = \frac{N_i}{\cos \Psi}. \quad (27)$$

Используется уравнение линии на плоскости [18], проходящей через две точки – M_1 (соответствует минимальной высоте) и M_2 . Точка M_2 выбирается из условия максимального угла уклона η или максимальной высоты препятствия в упрежденной зоне (уточняется на этапе аппроксимации препятствия):

$$\frac{H - H_1}{H_2 - H_1} = \frac{S - S_1}{S_2 - S_1}, \quad \operatorname{tg} \eta = \frac{H_2 - H_1}{S_2 - S_1}. \quad (28)$$

Проведя преобразования, получим уравнение линии ограничения в общем виде

$$A \cdot H + B \cdot S + C = 0, \quad (29)$$

где

$$A = S_2 - S_1, \quad B = -(H_2 - H_1), \quad C = S_1 H_2 - H_1 S_2.$$

Принимается, что задача увода от препятствия решается в вертикальной плоскости, скорость стабилизируется до выключения режима увода. В качестве управления выбирается перегрузка.

Составным элементом алгоритма основного режима АСПСР является выражение для вычисления расстояния $d(t)$ между текущей точкой положения ЛА $T(H_{ЛА}(t), S_{ЛА}(t))$ в выбранных координатах и линией ограничения

$$d(t) = \frac{|AH_{ЛА}(t) + BS_{ЛА}(t) + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = |\bar{a} \cdot H_{ЛА}(t) + \bar{b} \cdot S_{ЛА}(t) + \bar{c}|, \quad (30)$$

где преобразования очевидны.
Темп его изменения

$$\dot{d}(t) = \bar{a} \cdot \dot{H}_{ЛА}(t) + \bar{b} \cdot \dot{S}_{ЛА}(t) = V(\bar{a} \sin \theta(t) + \bar{b} \cos \theta(t)). \quad (31)$$

Продифференцировав (31), получим при $V = \text{const}$

$$\ddot{d}(t) = V(\bar{a} \cos \theta \cdot \dot{\theta}(t) - \bar{b} \sin \theta \cdot \dot{\theta}(t)), \quad (32)$$

после подстановки выражения для $\dot{\theta}$ получим

$$\ddot{d}_p = g[n_{yap} \cos \gamma_a(t) - \cos \theta(t)] [\bar{a} \cos \theta(t) - \bar{b} \sin \theta(t)]. \quad (33)$$

Выражение для расстояния включения ограничения

$$d_{\text{огр}}(t) = \frac{\dot{d}^2(t)}{2\ddot{d}_p(t)} = \frac{V^2 [\bar{a} \sin \theta(t) + \bar{b} \cos \theta(t)]^2}{2g[n_{yap} \cos \gamma_a(t) - \cos \theta(t)] [\bar{a} \cos \theta(t) - \bar{b} \sin \theta(t)]}. \quad (34)$$

Осуществление увода начинается при $d \leq d_{\text{огр}}$, а компенсационное управление с учетом (22), (26) соответствует выражению

$$\Delta n_{ya}(t) = \frac{1}{g \cos \gamma} [-\sin \theta \cos \theta] \times \begin{bmatrix} \Delta \ddot{X} \\ \Delta \ddot{H} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где соблюдается эквивалентность

$$\Delta \ddot{X} \equiv \Delta \ddot{S}, \quad (36)$$

входящие в разность ускорения вычисляются по общему выражению

$$\Delta \ddot{x}(t) = f(t) - f_p^{\text{yвoд}}. \quad (37)$$

Здесь $x^T = [X \ H]$, $f^T = [\ddot{X} \ \ddot{H}]$ вычисляются с использованием (16)–(18) для рассматриваемого случая; $f(t)$ – текущие значения производных; $f_p^{\text{yвoд}}$ – фиксированные значения производных, вычисленные для момента включения АСПСР при $d = d_{\text{огр}}$.

Рассмотренный алгоритм обеспечивает гарантированное получение реализуемой траектории увода от линии ограничения. Ал-

горитм адаптивен к уклону препятствия, располагаемым возможностям ЛА по управлению ограничению, параметрам положения и движения ЛА. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

Минимальный режим АСПСР для равнинного рельефа

Рассматривается случай, когда ограничение положения ЛА в пространстве задано не плоскостью ограничения или линией, а допустимыми значениями по соответствующим осям нормальной земной СК. В этом случае не используется картографическая база данных. Информационное АСПСР-обеспечение сводится к использованию интегрированных сигналов о геометрической и барометрической высотах.

Принимается, что задача увода от препятствия решается в вертикальной или наклонной плоскости, снижение может осуществляться с креном. В качестве управления выбирается перегрузка.

Осуществляется переход к принятым выше обозначениям

$$d = H - H_{\text{мин}}, \quad \dot{d} = V_{\kappa} \sin \theta, \quad d_{\text{огр}} = H_{\text{огр}} - H_{\text{мин}}, \quad \ddot{d} \equiv \ddot{H}, \quad (38)$$

где $H_{\text{мин}}$ – заданная на радиовысотомере минимальная высота.

Используется из (18) уравнение для $\ddot{H}_g$. Подставим в данное уравнение выражения для $\dot{V}_\kappa$ и $\dot{\theta}$ из (17):

$$\ddot{H}_g = g(n_{xa} - \sin \theta) \sin \theta + V_\kappa \cos \theta \frac{g}{V_\kappa} (n_{ya} \cos \gamma_a - \cos \theta). \quad (39)$$

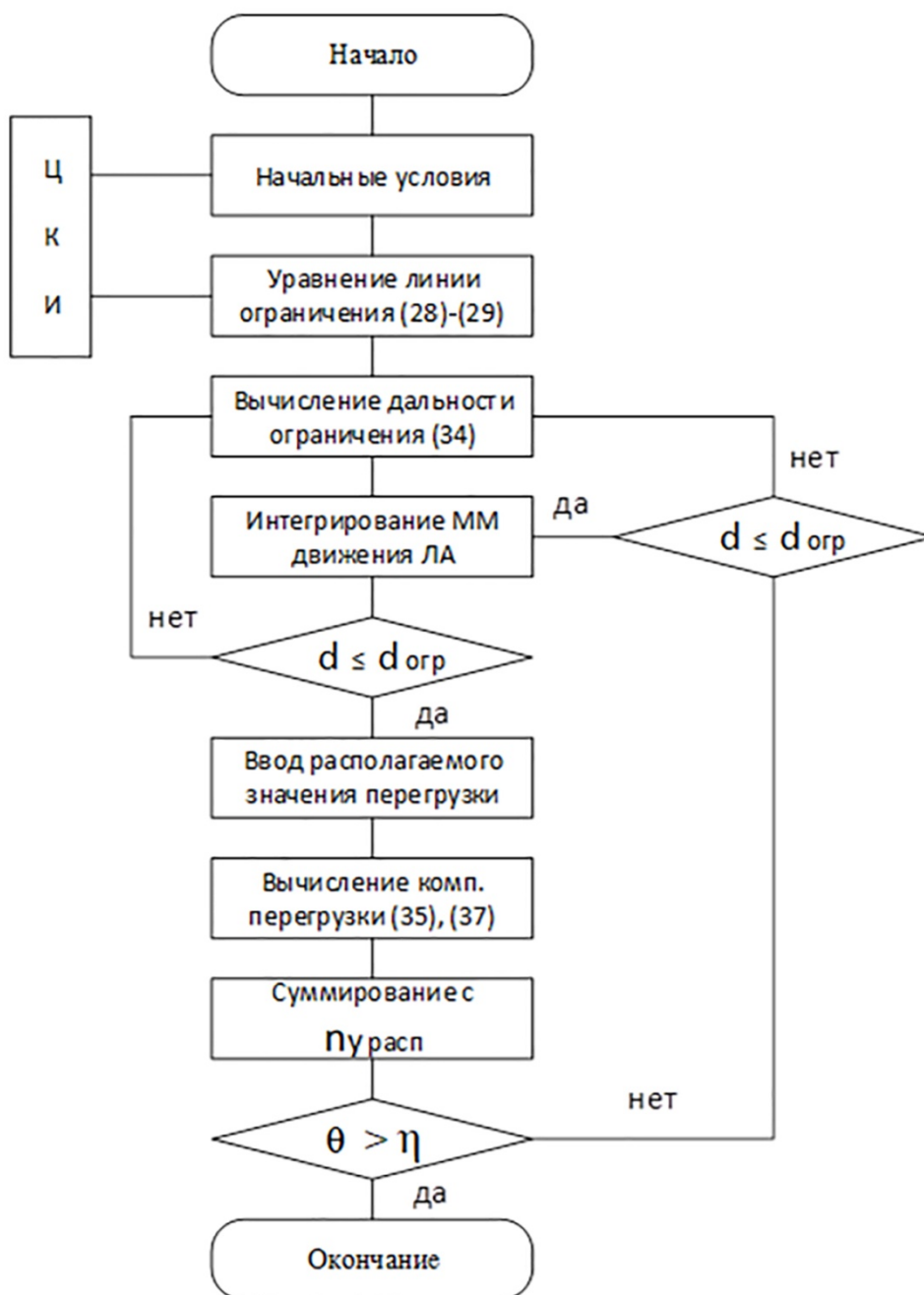


Рис. 3. Блок-схема алгоритма основного режима
Fig. 3. A block diagram of the major mode algorithm

После преобразований получим

$$\ddot{H}_g = g(n_{ya} \cos \gamma_a \cos \theta + n_{xa} \sin \theta - 1). \quad (40)$$

Выбрав в качестве управления увода предполагаемое значение перегрузки n_{yap} и заменив $\ddot{H}_g$ на $\ddot{d}_p$, получим

$$H_{огр} = H_{мин} + \frac{(V_{\kappa} \sin \theta)^2}{2g(n_{yap} \cos \gamma_a \cos \theta + n_{xa} \sin \theta - 1)}. \quad (42)$$

Осуществление увода начинается при $H \leq H_{огр}$, а компенсационное управление с учетом (22), (26) соответствует выражению

$$\Delta n_{ya}(t) = \frac{1}{g \cos \gamma_a(t) \cos \theta(t)} (\alpha_h(t) - \ddot{d}_p^{yood}), \quad (43)$$

где $\alpha_h(t), \ddot{d}_p^{yood}$ – текущее (поступающее из БИНС при бортовой реализации) и фиксированное вертикальные ускорения в момент и после включения увода. При моделировании $\alpha_h(t)$ вычисляется по выражению (41), в котором параметры γ_a, θ и n_{xa} изменяются после включения увода. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

Проанализируем выражения (42), (43) на адаптивность:

- высота включения увода $H_{огр}$ растет при уменьшении значений n_{yap} , при увеличении скорости, при увеличении угла пикирования ЛА, наличии угла крена и положительной перегрузки n_{xa} ;
- высота включения увода уменьшается с увеличением значений n_{yap} , при наличии отрицательной перегрузки n_{xa} и отсутствии крена;

$$\ddot{d}_p = g(n_{yap} \cos \gamma_a \cos \theta + n_{xa} \sin \theta - 1). \quad (41)$$

Выражение для вычисления высоты включения увода от земли имеет вид

- компенсационное управление логичным образом реагирует на изменение углов наклона траектории и крена после осуществления увода.

Приращение нормальной перегрузки $\Delta n_{ya}(t)$ должно обеспечиваться алгоритмами САУ. Компенсация запаздываний, вносимых пилотажным контуром и рулевыми приводами, при отработке задаваемой перегрузки достаточно легко осуществляется при моделировании путем добавления времени запаздывания к требуемому времени $t_{п}$. Более точную подстройку можно получить при использовании прогнозирующих моделей пилотажного контура [1], включающих модели рулевых приводов. При необходимости осуществляется пересчет перегрузок и углов из скоростной СК в связанную или обратно.

Эффективность рассмотренных алгоритмов АСПСР подтверждается обширным объемом моделирования. Алгоритмы могут быть базовой основой для создания российских аналогов семейства TAWS, но имеющих кардинальное отличие от них. Оно заключается в том, что АСПСР не только предупреждает экипаж о близости рельефа, но и автоматически гарантированно предотвращает столкновение с ним. Расширенное рассмотрение проблематики выдерживания ограничений можно найти в [5].

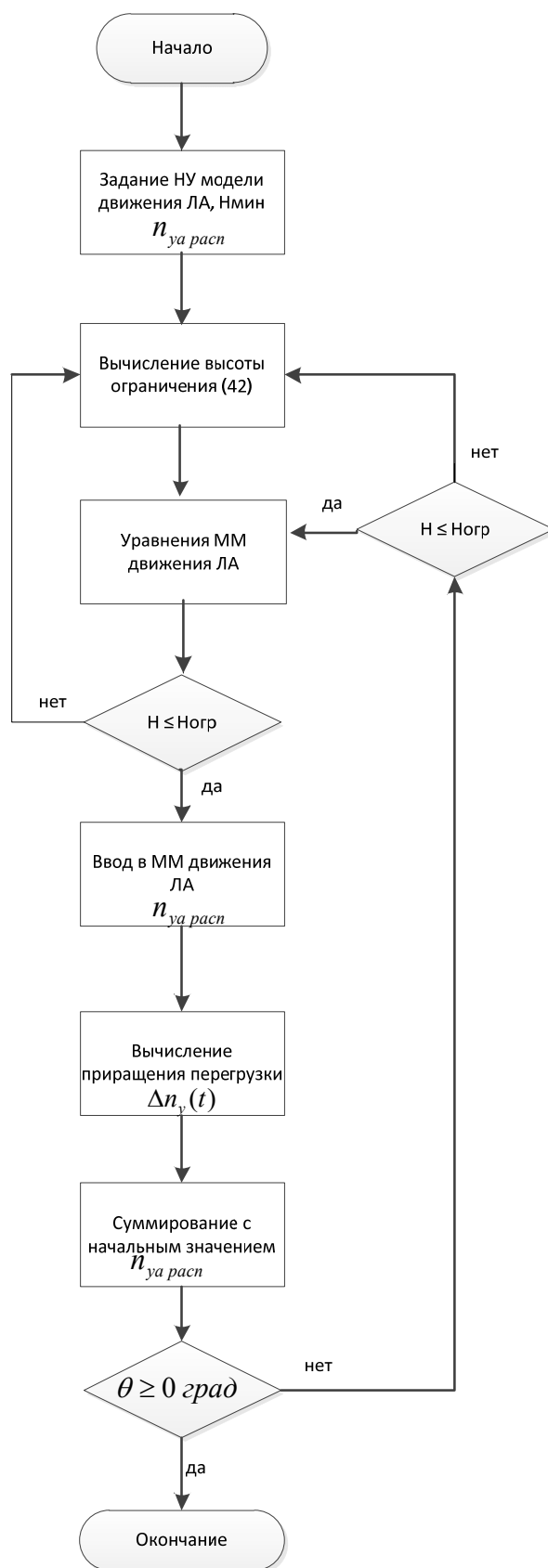


Рис. 4. Блок-схема алгоритма для равнинного рельефа
Fig. 4. A block diagram for the flat terrain algorithm

Список литературы

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 232 с.
2. Буков В.Н. Оптимальные алгоритмы в задачах с ограничениями управляемых координат // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 2. С. 210–217.
3. Акимов А.Н., Андреев В.В. Численный метод прямой оптимизации в задачах оптимального управления // Теория и системы управления. 1996. № 3. С. 37–43.
4. Акимов А.Н., Воробьев В.В. Методика и алгоритмы увода летательного аппарата от пространственной поверхности ограничения // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 18–25.
5. Акимов А.Н., Воробьев В.В., Лукашов С.В. Ограничение предельных режимов полета: метод, алгоритмы, результаты: учеб. пособие. М.: ВВИА им проф. Н.Е. Жуковского, 2003. 119 с.
6. Воробьев В.В., Суполка А.А. Методика автоматического исправления отклонений учебно-боевого самолета при заходе на посадку // Научные технологии. 2008. Т. 9, № 3. С. 41–45.
7. Воробьев В.В., Беляцкая А.П., Суполка А.А. Методика устранения отклонений воздушного судна при предпосадочном снижении для предотвращения происшествий категории CFIT // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44
8. Beliatkaia A.P., Vorobev V.V., Eliseev B.P. Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing // 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021. Moscow, 29–30 May 2021. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239
9. Воробьев В.В., Гриценко Н.А., Старикова И.О. Основные принципы обеспечения безопасной эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на стадиях жизненно-

го цикла // Инновации в гражданской авиации. 2016. № 4. С. 62–70.

10. Воробьев В.В., Мозоляко Е.В. Проблемы предотвращения столкновения гражданских воздушных судов в управляемом полете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 183. С. 109–113.

11. Кравцов М.С. Апробация метода «виртуальных полигонов» / М.С. Кравцов, И.И. Бублик, В.И. Журавель, А.А. Супряга // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сборник научных статей III Всероссийской НПК «АВИАТОР». 11–12 февраля 2016 г. В 2-х тт. Т. 2. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. С. 73–76.

12. Апрельский Е.Н. Прогнозирование движения маневренного самолета в задаче повышения противоперегрузочной защиты летчика / Е.Н. Апрельский, В.В. Воробьев, А.С. Куренков, В.Н. Чернуха // Научные технологии. 2009. Т. 10, № 2. С. 82–88.

13. Воробьев В.В. Безопасность полетов гражданских воздушных судов: учебник / В.В. Воробьев, Л.Г. Большедворская, Б.В. Зубков, И.Н. Мерзликин, О.В. Пахомов, П.М. Поляков, С.Е. Прозоров, А.Л. Рыбалкина, В.Д. Шаров. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2021. 440 с.

14. Wilkinson N. Latest Developments of the TERPROM® Digital terrain system / N. Wilkinson, T. Brookes, A. Price, M. Godfrey // Paper presented at the Joint Navigation Conference, USA: Orlando, Florida, June 2009. 16 p.

15. Fuller J.G., Hook L.R. Understanding general aviation accidents in terms of safety systems // 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2020. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/DASC50938.2020.9256778

16. Causse M. Mirror neuron based alerts for control flight into terrain avoidance / M. Causse, J. Phan, T. Ségonzac, F. Dehais. In book: Advances in Cognitive Engineering and Neuroergonomics, 2012. Chapter 17. 10 p. DOI: 10.1201/b12313

17. Baldwin J., Cassell R., Smith A. GPS-based terrain avoidance systems – a solution for general aviation controlled flight into terrain // Proceedings of the 1995 National Technical

Meeting of The Institute of Navigation, CA: Anaheim, 18–20 January 1995. Pp. 413–417.

18. Августов Л.И. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве / Л.И. Августов, А.В. Бабиченко, М.И. Орехов, С.Я. Сухоруков, В.К. Шкред. М.: Научтехлитиздат, 2015. 589 с.

19. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Астрель, 2006. 991с.

20. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит, 2010. 560 с.

References

1. Bukov, V.N. (1987). [*Adaptive predictive flight control systems*]. Moscow: Nauka, 232 p. (in Russian)

2. Bukov, V.N. (1982). [*Optimal algorithms in tasks with controlled coordinates constraints*]. Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika, no. 2, pp. 210–217. (in Russian)

3. Akimov, A.N. & Andreev, V.V. (1996). [*Numerical direct optimization method in optimal control tasks*]. Teoriya i sistemy upravleniya, no. 3, pp. 37–43. (in Russian)

4. Akimov, A.N. & Vorob'ev, V.V. (2001). *A method and algorithms for veering a flying apparatus from the spatial constraint surface*. Automation and Remote Control, vol. 62, no. 7, pp. 1042–1048. DOI: 10.1023/A:1010293424171

5. Akimov, A.N., Vorob'ev, V.V. & Lukashov, S.V. (2003). [*Limiting flight modes: method, algorithms, results: Tutorial*]. Moscow: VVIA im prof. N.Ye. Zhukovskogo, 119 p. (in Russian)

6. Vorob'ev, V.V. & Supolka, A.A. (2008). *A technique for automatic correction of teaching-combat aircraft deviations at sanding*. Science Intensive Technologies, vol. 9, no. 3, pp. 41–45. (in Russian)

7. Vorob'ev, V.V., Beliatckaia, A.P. & Supolka, A.A. (2020). *Methodic aspects of aircraft glide slope correction for prevention of CFIT category accidents during pre-landing descent*. Civil Aviation High Technologies, vol. 23, no. 4, pp. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44 (in Russian)

8. Beliatckaia, A.P., Vorobev, V.V. & Eliseev, B.P. (2021). *Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing*. 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239

9. Vorob'ev, V.V., Gritsenko, N.A. & Starikova, I.O. (2016). [*The basic principles of safe unmanned aircraft operation at the life cycle stages*]. Innovations in civil aviation, no. 4, pp. 62–70. (in Russian)

10. Vorobyev, V.V. & Mozolyaco, E.V. (2012). *Problems preventing conflicts in civil aircraft controlled flight*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 183, pp. 109–113. (in Russian)

11. Kravtsov, M.S., Bublik, I.I., Zhuravel, V.I. & Supriaga, A.A. (2016). [*Topical issues of research in avionics: theory, maintenance, development: proceedings of the III All-Russian Research and Production Company "AVIATOR". In 2 vols. Vol. 2*]. Voronezh: VUNTS VVS «VVA», pp. 73–76. (in Russian)

12. Aprel'ski, E.N., Vorob'ev, V.V., Kurenkov, A.S. & Chernuha, V.N. (2009). *Prediction of manoeuvre aircraft movement in the problem of improving pilot's overload protection*. Science Intensive Technologies, vol. 10, no. 2, pp. 82–88. (in Russian)

13. Vorob'ev, V.V., Bolshedvorskaya, L.G., Zubkov, B.V., Merzlikin, I.N., Pakhomov, O.V., Polyakov, P.M., Prozorov, S.E., Rybalkina, A.L. & Sharov, V.D. (2021). [*Flight safety of civil aircraft: Textbook*]. Moscow: Izdatelskiy dom Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, 440 p. (in Russian)

14. Wilkinson, N., Brookes, T., Price, A., & Godfrey, M. (2009). *Latest developments of the TERPROM® Digital terrain system*. Paper presented at the Joint Navigation Conference, Orlando, Florida, USA, 16 p.

15. Fuller, J.G. & Hook, L.R. (2020). *Understanding general aviation accidents in terms of safety systems*. 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 1–9. DOI: 10.1109/DASC50938.2020.9256778

16. Causse, M., Phan, J., Ségonzac, T. & Dehais, F. (2012). *Mirror neuron based alerts for control flight into terrain avoidance*. In book: *Advances in Cognitive Engineering and Neuroergonomics*, Chapter 17, 10 p. DOI: 10.1201/b12313

17. Baldwin, J., Cassell, R. & Smith, A. (1995). *GPS-based terrain avoidance systems – a solution for general aviation controlled flight into terrain*. Proceedings of the 1995 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Anaheim, CA, pp. 413–417.

18. Augustov, L.I., Babichenko, A.V., Orekhov, M.I., Sukhorukov, S.Ya. & Shkred, V.K. (2015). [*Navigation of aircraft in near-Earth space*]. Moscow: Nauchtekhlitizdat, 589 p. (in Russian)

19. Vygodskiy, M.Ya. (2006). [*Handbook of higher mathematics*]. Moscow: Astrel, 991 p. (in Russian)

20. Gantmakher, F.R. (2010). [*Matrix theory*]. 5th ed., Moscow: Fizmatlit, 560 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Акимов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный специалист, Объединенная авиастроительная корпорация, Akim521@yandex.ru.

Волошин Владимир Андреевич, ведущий программист, Объединенная авиастроительная корпорация, job_vva@mail.ru.

Супрыга Андрей Алексеевич, заместитель начальника отдела, Объединенная авиастроительная корпорация, bariy29@list.ru.

Information about the authors

Alexander N. Akimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Specialist, United Aircraft Building Company, Akim521@yandex.ru.

Vladimir A. Voloshin, Programming Supervisor, United Aircraft Building Company, job_vva@mail.ru.

Andrey A. Supryga, Deputy Head of the Department, United Aircraft Building Company, bariy29@list.ru.

Поступила в редакцию 26.07.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 26.07.2022
Accepted for publication 24.11.2022

УДК 658.8.031
DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-23-39

Анализ применимости корреляционно-регрессионных моделей для оценки факторов поставки авиатоплива в труднодоступные арктические районы Крайнего Севера

В.П. Горбунов¹, В.М. Самойленко², С.В. Кузнецов²,
А.М. Стручкова^{1,3}

¹АО «Авиакомпания "Якутия"», г. Якутск, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

³Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

Аннотация: Воздушный транспорт является стратегически важным видом транспорта для большей части Дальнего Востока и Крайнего Севера, и особенно в арктических районах. Воздушные авиаперевозки выполняют важнейшую социально-экономическую роль, обеспечивая наиболее быструю связь с остальной территорией России и жизненно необходимую транспортную доступность населения стратегически важного региона Российской Федерации. Особую роль воздушный транспорт играет в крупнейшем регионе Российской Федерации Республике Саха (Якутия), которая остается наиболее изолированным и труднодоступным регионом страны. В республике на 85 % территории авиация является единственным круглогодичным средством транспортного сообщения. При этом важнейшим фактором, влияющим на круглогодичное обеспечение транспортной доступности для подавляющего большинства аэропортов республики, и в особенности арктической зоны, является завоз необходимого количества авиатоплива при условии сохранения его потребительских свойств. Не имеющая аналогов сложнейшая схема завоза авиатоплива в арктические и труднодоступные районы Якутии с количеством перевалок до девяти приводит к потере некоторых важных параметров авиатоплива, таких как электропроводность, и вынуждает авиакомпании, выполняющие полеты в арктические и труднодоступные районы Якутии искать более оптимальные логистические пути завоза, хранения, обеспечивая сохранность свойств и параметров авиатоплива. Другим фактором, напрямую влияющим на круглогодичное обеспечение транспортной доступности населения, является стоимость авиатоплива, составляющая около 30 % в расходах базовых авиакомпаний, таких как авиакомпания «Якутия», где в базовом аэропорту Якутск стоимость авиатоплива в 2021 году достигала 88 тыс. рублей за тонну при условии заправки «в крыло», при среднем значении по всем аэропортам России около 58 тыс. рублей за тонну. При этом стоимость авиатоплива в арктических аэропортах вплотную приблизилась или уже достигла 100 тыс. за тонну. Для поиска решений авторами данной статьи использована методология исследования на основе факторного анализа с использованием аппарата экономико-математического моделирования проблемы завоза авиатоплива за счет оптимизации логистической схемы поставки в удаленные регионы арктической зоны. Путем оценки возможностей применения корреляционно-регрессионного анализа проведена оценка факторов, влияющих на оптимизацию завоза авиатоплива путем оптимизации логистической схемы. Как результат исследования и наряду с предложенными решениями практико-технологического и экономического характеров рассмотрена применимость регрессионной модели, на основе которой могут быть выбраны наиболее оптимальные варианты развития топливного обеспечения Республики Якутия для воздушного транспорта в предстоящем периоде.

Ключевые слова: арктические районы, авиатранспортная доступность, логистика завоза авиатоплива, стоимость, качество топлива, электропроводность, факторный и корреляционно-регрессионный анализ, экономико-математическое моделирование, регрессионная модель.

Для цитирования: Горбунов В.П., Самойленко В.М., Саввина А.М. Анализ применимости корреляционно-регрессионных моделей для оценки факторов поставки авиатоплива в труднодоступные арктические районы Крайнего Севера // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 23–39. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-23-39

Analysis of the applicability of correlation and regression models to assess the factors of aviation fuel supply to the remote Arctic regions of the Far North

V.P. Gorbunov¹, V.M. Samoylenko², S.V. Kuznetsov²,
A.M. Struchkova^{1,3}

¹JSC "Yakutia Airlines", Yakutsk, Russia

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

³Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"M.K. Ammosov North-Eastern Federal University", Yakutsk, Russia

Abstract: Air transport for the Far East and the Far North is a strategically important mode of transport for most of its part and especially in the Arctic regions. Air transportation plays the most important social and economic role, providing the fastest connection with the rest of Russia and vital transport accessibility of the population of a strategically important region of the Russian Federation. Air transport plays a special role in the largest region of the Russian Federation, the Republic of Sakha (Yakutia), which remains the most isolated and inaccessible region of the country. In the republic, aviation is the only year-round means of transport communication on 85% of the territory. At the same time, the most important factor affecting the year-round provision of transport accessibility for the vast majority of airports in the republic, and especially in the Arctic zone, is the delivery of the required amount of aviation fuel, provided that its consumer properties are preserved. The unique and complex scheme of aviation fuel delivery to the Arctic and remote areas of Yakutia, with up to nine transshipments, leads to the loss of some important parameters of aviation fuel, such as electrical conductivity, and forces airlines flying to the Arctic and remote areas of Yakutia to look for more optimal logistics ways of delivery, storage, ensuring the safety of properties and parameters of aviation fuel. Another factor that directly affects the year-round provision of transport accessibility of the population is the cost of jet fuel, which is about 30 % of the costs of base airlines, such as Yakutia Airlines, where at the base airport Yakutsk the cost of jet fuel in 2021 reached 88 thousand rubles per ton, provided refueling in the wing, with an average value for all airports Russia has about 58 thousand rubles per ton. At the same time, the cost of jet fuel at Arctic airports has approached or has already reached 100 thousand per ton. In order, to find solutions, the authors of this article used a research methodology based on factor analysis using the apparatus of economic and mathematical modeling of the problem of jet fuel delivery due to optimization of the logistics scheme of delivery to remote regions of the Arctic zone. By applying capability assessments correlation and regression analysis, estimation factors for the jet fuel supply chain optimization by optimizing the logistics scheme were carried out. As a result of the research and along with the proposed solutions of practical, technological and economic nature, a regression model is considered on the basis of which the most optimal options for the development of fuel supply of the Republic of Yakutia for air transport in the coming period can be suggested.

Key words: Arctic regions, air transport accessibility, logistics of jet fuel delivery, cost, fuel quality, electrical conductivity, factor and correlation regression analysis, economic and mathematical modeling, regression model.

For citation: Gorbunov, V.P., Samoylenko, V.M. & Savvina A.M. (2022). Analysis of the applicability of correlation and regression models to assess the factors of aviation fuel supply to the remote Arctic regions of the Far North. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 23–39. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-23–39

Введение

В период последних нескольких десятилетий наблюдался значительный рост авиатранспортной отрасли в части авиаперевозок и увеличение количества самолетовылетов и пассажиропотока в целом. Для поддержки авиаперевозчиков государственными и частными владельцами аэропортов и аэропортовых объединений проводились значительные капитальные вложения в реконструкцию инфраструктуры аэропортов и развитие аэропортовой сети. Яр-

ким примером является успешно реализуемая ФГУП «Аэропорты Севера» программа реконструкции аэропортовой сети, объединяющей 32 аэропорта на территории Республики Саха (Якутия) и два аэропорта Чукотки. Важным условием для роста данного сегмента авиаперевозок явились обеспечение авиатопливом, его конечная стоимость и логистическая доступность, которые могли бы в значительной степени стимулировать дальнейший рост перспективного сектора экономики. Однако за последние несколько лет с новой остротой обо-

значились критические факторы, влияющие на конечную стоимость топлива непосредственно в аэропортах арктической зоны, такие как сложности в логистической цепочке поставок авиатоплива, и прежде всего многочисленные перевалки со сменой транспорта при поставке в труднодоступные районы арктической зоны Крайнего Севера [1, 2].

Чтобы провести анализ и понять современное состояние дел с авиатопливообеспечением в районах Крайнего Севера и Арктики, необходимо детально разобраться во всей технологической цепочке от производства до транспортировки авиатоплива в удаленные аэропорты, что поможет определить основные факторы ценообразования авиаперелетов, а также понять стоимостные риски при поставке авиакомпаниям топлива в рассматриваемый регион.

Еще больше усугубляет проблему логистической цепочки поставок озабоченность нефтяных компаний рисками сокращения оборотных средств при хранении больших запасов топлива. Во многих случаях авиакомпании вынуждены покупать топливо у топливозаправочных компаний (ТЗК) непосредственно в аэропорту, предполагая, что их поставщики имеют достаточные запасы топлива в самом аэропорту и по приемлемой цене¹, но чаще всего оказываются в роли «ценовых заложников» у монопольного поставщика. Приход на рынок второй топливозаправочной компании, т. е. конкурента, также не дает ожидаемого ценового эффекта, или же последний становится кратковременным, так как новый игрок в результате сложившейся конъюнктуры подстраивается под имеющиеся ценовые условия в том или ином аэропорту или же регионе. В результате авиакомпании попадают в зависимость и не имеют времени и средств для поиска альтернативы из-за сложно-временной логистической цепочки поставок из перевалочных пунктов в арктические районы и, главное, возможности

влиять на ценовую обоснованность и прозрачность самих поставок. Закупка авиакомпаниями авиатоплива самостоятельно на рынке или на международной товарно-сырьевой бирже в Санкт-Петербурге, безусловно, является существенно более эффективным бизнес-решением, позволяющим хеджировать цены, однако требует значительных свободных финансовых средств и, главное, не решает сложных логистических проблем поставок топлива в отдаленные районы Арктики [3, 4].

Эффективное управление современными системами обеспечения транспортной инфраструктуры невозможно без использования методов экономико-математического моделирования для критического анализа факторов текущего состояния. Так, в регионах с повышенными рисками на деятельность любого предприятия воздушного транспорта и системы обеспечения бесперебойной работы на Крайнем Севере, Арктике и на всем Дальнем Востоке существенное влияние оказывают многочисленные факторы внешней и внутренней среды, природного и антропогенного характера [5].

Особенности обеспечения авиатопливом в аэропортах арктической зоны

Организация завоза авиатоплива является стратегической задачей, напрямую влияющей на бесперебойное (стабильное) жизнеобеспечение регионов арктической зоны, в том числе и Республики Саха (Якутия). При этом наиболее важным фактором формирования конечной стоимости авиационного топлива для авиакомпаний России является географический, который включает в себя степень удаленности от производителей – нефтеперерабатывающих заводов; проблему климатического влияния на технологический процесс доставки топлива; возможность хранения и транспортировки. Так, Республика Саха (Якутия) из-за огромных размеров (площадь более 3 млн кв. км), но численности населения менее одного миллиона является регионом с особыми транспортно-логистиче-

¹ Постановление Правительства РФ от 22.07.2009 № 599 «О порядке обеспечения доступа к услугам субъектов естественных монополий в аэропортах» [Электронный ресурс] // consultant.ru. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89863/ (дата обращения: 14.08.2021).

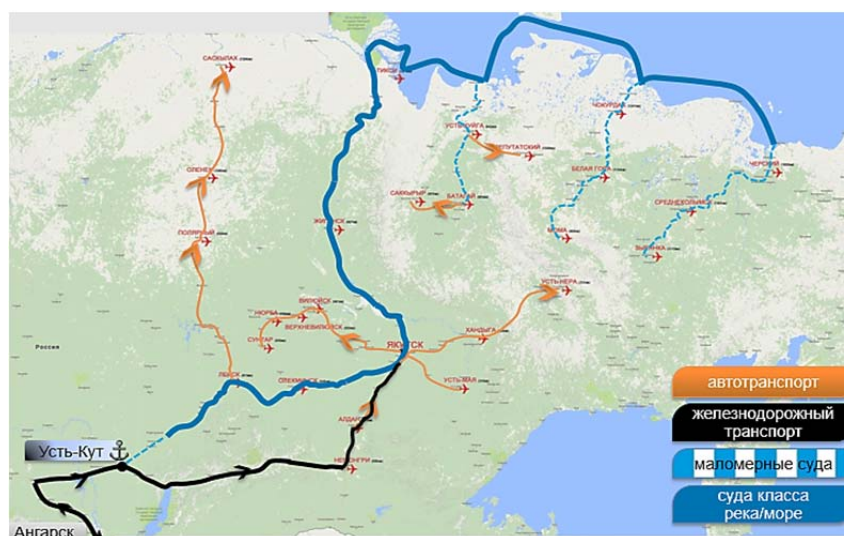


Рис. 1. Действующая схема завоза авиатоплива в Республику Саха (Якутия)
Fig. 1. The current scheme for the jet fuel delivery to the Republic of Sakha (Yakutia)

скими системами доставки топлива. Наземная транспортная инфраструктура круглогодичного действия во многих районах республики практически отсутствует (около 90 % территории не имеет круглогодичной транспортной доступности), что делает социальную сферу и экономику региона чрезвычайно зависимыми от авиационного сообщения. Поэтому для 85 % территории авиация является единственным круглогодичным средством транспортного сообщения. Разброс населенных пунктов и, соответственно, аэродромной сети в арктической зоне, отсутствие круглогодичного транспортного сообщения, кроме воздушного, погодно-климатические условия и географическая удаленность от транспортных узлов РФ делают географический фактор ключевым звеном во всей цепочке ценообразования конечной стоимости этого жизненно важного продукта. Поэтому для арктической зоны важно решение проблем отсутствия развитой аэродромной сети, современных региональных воздушных судов, приспособленных для эксплуатации в условиях экстремально низких температур, что усиливает влияние географического фактора, имеющего наиболее решающее значение в обеспечении транспортной доступности стратегического региона Арктики.

Основной проблемой авиатопливообеспечения является формирование конечной сто-

имости авиатоплива в аэропортах той территории Якутии, которая не имеет железнодорожного сообщения, и особенно в аэропортах арктической зоны, где ключевым фактором, наряду с географической удаленностью, являются природные условия северного региона и система снабжения авиационным топливом существенно затруднена.

В 2021 году наблюдался существенный рост цен на топливо при торгах на Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой бирже, где за последние полгода цена авиационного керосина превысила 60 тыс. рублей за тонну продукта. В свою очередь, учитывая всю сложную логику поставки, стоимость тонны авиатоплива в Якутске на осень 2021 года поднялась до 88 тыс. рублей с поставкой «в крыло». В арктических же аэропортах (Черский, Чокурдах, Саскыллах, Оленок), где конечная стоимость формируется сложной логистикой и многократной перевалкой топлива до 8 раз в такие аэропорты, как Депутатский, Белая Гора, Среднеколымск, Зырянка, и до 9 раз в аэропорты Батагай, Мома и Саккырыр (рис. 1), она уже вплотную приблизилась к 100 тыс. рублей.

Организация завоза авиатоплива в республику для нужд авиакомпаний имеет многоступенчатую схему поставки с многократной сменой видов транспорта и перевалочных пунктов. Поставка авиатоплива от ближайшего нефте-



Рис. 2. Действующая схема завоза авиатоплива Чукотского автономного округа
Fig. 2. The current scheme for the jet fuel delivery in the Chukotka Autonomous District

перерабатывающего завода (НПЗ) г. Ангарска осуществляется сначала железнодорожным транспортом до пунктов накопления в п. Усть-Кут Иркутской области для его дальнейшей перевалки и транспортировки. В Усть-Куте топливо, предназначенное для аэропортов Нерюнгри, Алдан, Якутск, отправляется железнодорожным транспортом, другая часть топлива перегружается на маломерные суда для транспортировки по мелководному руслу реки Лены. Одновременно с этим часть топлива, предназначенная для снабжения северо-западной части Якутии, аэропортов Полярный, Оленек и Саскыллах, транспортируется автоцистернами по «зимникам» в г. Ленск. Но основная часть топлива, как сказано выше предназначенная для группы аэропортов центральной части Якутии, транспортируется ж/д транспортом на ближайшую к аэропорту Якутска станцию Нижний Бестях. Далее часть топлива для труднодоступных и отдаленных арктических аэропортов с перевалкой груза на водный транспорт проводится до пунктов доставки и хранения по двухступенчатой схеме в зависимости от сезона (рис. 1):

- с момента открытия навигации (с июня) по главной магистральной реке Лене на боковые и малые реки Вилюй, Алдан, Амга;
- после открытия навигации на арктических реках Яне, Индигирке и Колыме (с середины июня – июля) груз, завезенный в предыдущую навигацию, из пунктов хранения доставляется в аэропорты назначения;

- с открытием арктической навигации по Северному морскому пути, с августа, груз перевозится по магистральной реке Лене, морским путем и далее по арктическим рекам Яне, Индигирке, Колыме, Оленек и Анабар^{2,3}.

Такую же сложную логистическую схему поставки имеют и другие регионы Крайнего Севера, например аэропорты Чукотского автономного округа (рис. 2).

Транспортировка осуществляется в три этапа продолжительностью более 9 тыс. километров и занимает от девяти месяцев. Первый этап транспортировки происходит от нефтеперерабатывающего завода речным транспортом по рекам Иртыш и Обь. Затем производится перегрузка в морские танкеры и далее до портов Певек и Анадырь, а также мыс

² Постановление Правительства Республики Саха (Якутия) от 26 декабря 2016 года № 455 о проекте стратегии социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года с определением целевого видения до 2050 года [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. 2017. 332 с. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/1400201701030003?rangeSize=50> (дата обращения: 14.08.2021).

³ Указ Президента Республики Саха (Якутия) от 12 октября 2011 г. № 985 «О государственной программе Республики Саха (Якутия) "Обеспечение безопасности жизнедеятельности населения Республики Саха (Якутия) на 2012–2019 годы"» [Электронный ресурс] // garant.ru. URL: <https://base.garant.ru/26727472/#friends> (дата обращения: 14.08.2021).

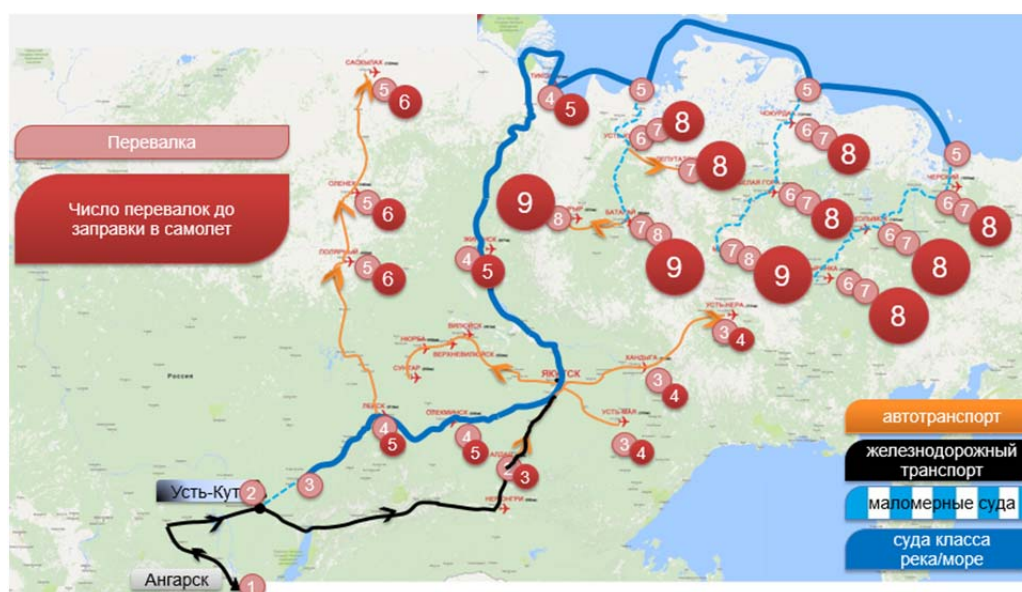


Рис. 3. Действующая схема завоза авиатоплива в Республику Саха (Якутия)
Fig. 3. The current scheme for the jet fuel delivery to the Republic of Sakha (Yakutia)

Шмидта, Лаврентия, Провидения, Эгвекино и Беринговский. Третий этап состоит в доставке авиатоплива из города Певека в аэропорт поселка Кепервеем также по «зимникам».

Сложная логистика транспортировки топлива в районы Крайнего Севера и необходимость его последующего хранения с возможностью использования только на следующий год от закупки и начала транспортировки кроме удорожания имеет риск снижения качества топлива в конечном пункте хранения, например по параметру электропроводности, что в конечном счете вынуждает авиакомпании списывать десятки тонн с трудом доставленного топлива на технические нужды [6, 7].

Завоз авиатоплива усложняется следующими природными факторами:

- в летний период – спадом уровня воды на реках республики и ограничением судоходства;
- в зимний период – обильными осадками (снег) в северных арктических районах.

В отдельные населенные пункты, особенно арктических и северных улусов, транспортная доступность которых составляет от 30 до 90 дней, доставка авиатоплива осуществляется в зимний период только автомобильным транспортом при открытии «зимника».

Ситуацию усугубляет тот факт, что на территории Республики Саха (Якутия) отсутствует гарантирующий поставщик авиатоплива в аэропортах следующих населенных пунктов:

- с 2016 г.: г. Мирный, г. Ленск, г. Олекминск, п. Оленек, п. Саскыллах, п. Полярный и п. Усть-Нера;
- с 2017 г.: г. Вилуйск, г. Нюрба, п. Сунтар.

География территории «без гарантирующего поставщика авиатоплива» имеет тенденцию роста. Несмотря на условия ограниченных оборотных средств, авиакомпания «Якутия», «Полярные авиалинии», организуют завоз и хранение авиатоплива собственными ресурсами. Закупая авиатопливо на Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой бирже, авиакомпания выполняет несвойственную, по сравнению с другими регионами, функцию, обеспечивая доставку и хранение топлива по всей логистической цепочке до вышеназванных пунктов самостоятельно.

Беспрецедентным является тот факт, что после всей многоступенчатой транспортировки авиатоплива с восемью или девятью перевалками, его использование для заправки воздушных судов возможно только на второй год после закупки (рис. 3).

Проблема качества. Потеря удельной электропроводности авиационного топлива

В 2017–2018 гг. остро проявилась проблема с обеспечением качественных показателей авиатоплива в разных точках аэропортовой сети республики. В связи с отсутствием качественного авиатоплива в ряде северных аэропортов республики, дополнительные некомпенсируемые затраты авиакомпании «Якутия», связанные с дополнительной посадкой воздушных судов на дозаправку в другие аэропорты, составили 43,5 млн рублей.

Вопрос по качественным показателям авиатоплива удельной электропроводимости становится очень острым для гражданской авиации по всей территории Республики Саха (Якутия). Одним из факторов, влияющих на завоз авиатоплива, является высокое требование к качеству авиатоплива, обеспечение которого затруднено в условиях старения существующей инфраструктуры при многократной перевалке во время перевозки водным транспортом авиатоплива до конечных пунктов. Электрические свойства топлива в значительной степени определяются удельной электрической проводимостью, которая для товарных реактивных топлив выражается в единицах пикосименс/метр ($1 \text{ пСм/м} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) [6, 7]. Особенно опасна электризация тех видов топлив, которые имеют широко фракционный состав с бензиновыми фракциями⁴ [8, 9].

Именно значительное количество смен средств транспорта доставки, так называемых перевалок топлива – слива-налива и перекачек по трубопроводам со сменой транспортных емкостей или емкостей хранения, оказывает негативное влияние на качество доставляемого топлива в конечный пункт назначения, где выявляется ухудшение электрических свойств топлива, т. е. параметра удельной электропроводности. Критически максимальными значе-

ниями до восьми или даже девяти перевалок топлива характеризуется доставка топлив в такие аэропорты, как Батагай, Зырянка, Саккырыр, Черский, Чокурдах, Среднеколымск и Белая Гора (рис. 3).

Тенденции топливного рынка Республики Саха (Якутия) и их сравнение с общероссийским рынком

Наиболее весомым ценовым фактором в экономике авиакомпаний, выполняющих полеты в арктические районы и обеспечивающих транспортную доступность региона, является формирование стоимости авиатоплива в базовом аэропорту г. Якутска, где, как уже указывалось, наличие двух альтернативных поставщиков не дало значимого эффекта снижения цены или этот эффект был кратковременным (рис. 4). Анализ динамики цен на авиатопливо у двух основных поставщиков за 2020 и 2021 годы в ключевом для обеспечения транспортной доступности региона аэропорту Якутск показывает тенденцию устойчивого его роста (рис. 5).

При существующей конъюнктуре цен на рынке авиатоплива авиакомпании смогут рассчитывать на дополнительную компенсацию затрат на авиатопливо только в случае увеличения цены экспортной альтернативы (Цкер ЭКСП) более чем на 10 % от текущего значения, исходя из установленной законом формулы расчета дополнительного возмещения акциза (Вавиа).

Установленный Федеральным законом от 30.07.2019 № 255-ФЗ «О внесении изменений в часть вторую Налогового кодекса РФ» демпфирующий механизм формально предполагает возможность получения авиакомпаниями дополнительного возмещения акциза (Вавиа) за каждую тонну закупленного топлива в размере 70 % в 2019 г. и 65 % с 2020 г. разницы между средней ценой экспортной альтернативы (Цкер ЭКСП) и условным значением средней оптовой цены реализации авиационного керосина на территории РФ (Цкер ВР).

⁴ Реактивные топлива (Электрические свойства топлива). Нектон-Сиа. [Электронный ресурс] // НЕКТОН СИА. URL: https://nec-ton-sea.ru/articles/reaktivnye_topliva_%28elektricheskie_sv_oystva_topliva%29/ (дата обращения: 14.08.2021).

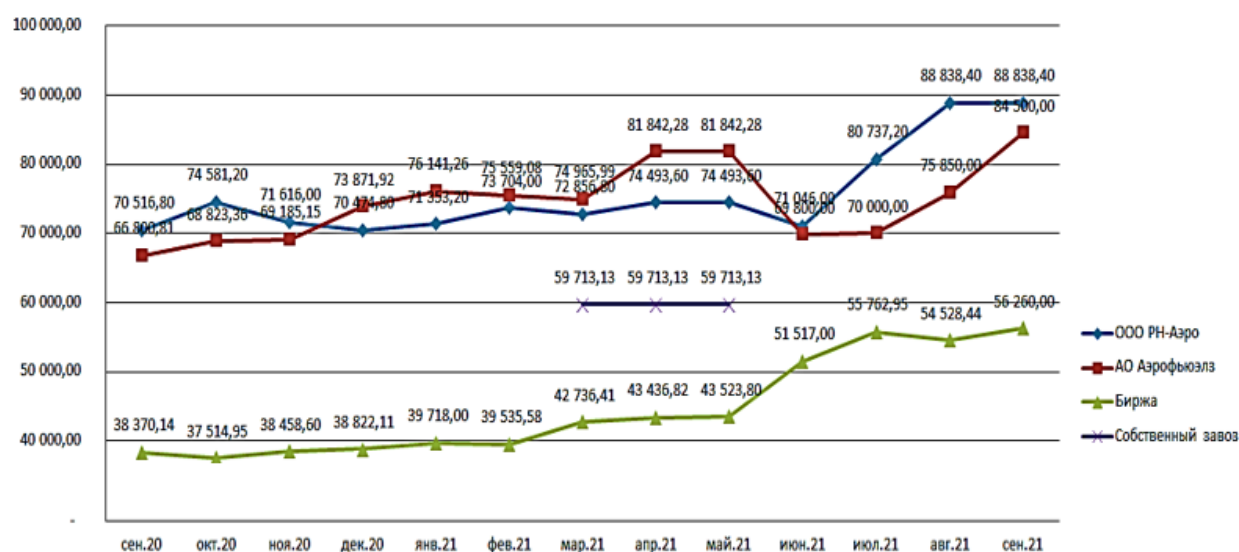


Рис. 4. Сравнение средней стоимости авиатоплива по данным Росавиации со стоимостью авиатоплива «в крыло» с НДС в Якутске за период 2018–2021 гг.

Fig. 4. Comparison of the average cost of jet fuel according to the Federal Air Transport Agency with the cost of jet fuel "in the wing" with VAT, in Yakutsk for the period 2018–2021

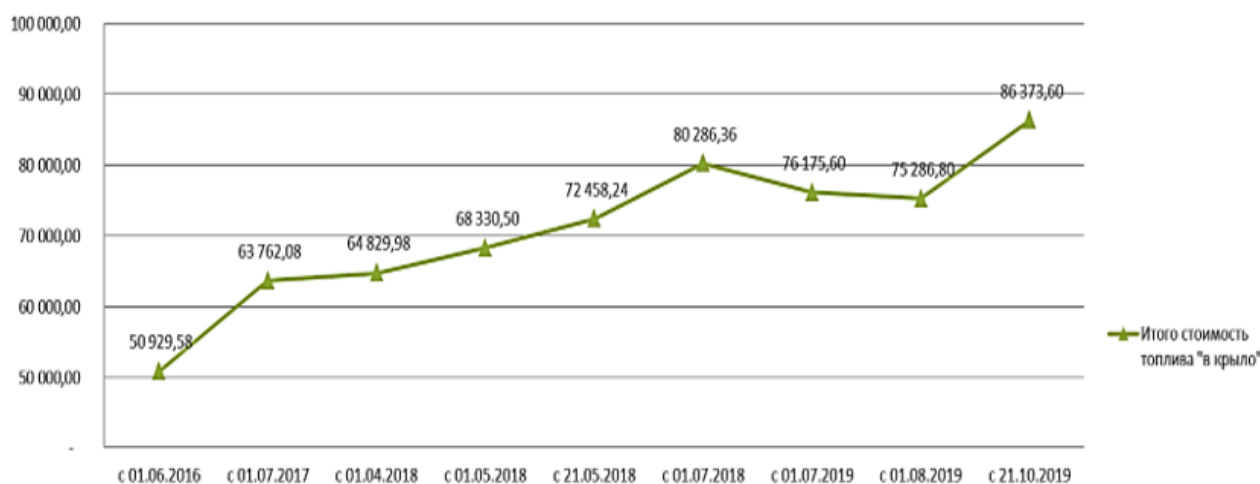


Рис. 5. Стоимость авиатоплива «в крыло» в Якутске за период с 01.06.2016 по 21.10.2019

Fig. 5. The cost of jet fuel "in the wing" in the city of Yakutsk for the period from 06/01/2016 until 10/21/2019

Из рассчитанного, например, за август допандемийного 2019 года значения цены экспортной альтернативы (Цкер ЭКСП) дополнительное возмещение за август будет равно нулю. Последующий ежегодный рост на 5 % установленного законом значения Цкер ВР снижает вероятность дополнительного возмещения акциза в будущем почти до нуля.

Методология исследования

Факторный анализ проблемы завоза авиатоплива путем оптимизации логистической схемы

В условиях реальной экономики между результативными показателями и факторами действуют вероятностные (стохастические) связи. Оценить результаты их действия воз-

Таблица 1
Table 1

Параметры регрессионной модели
Parameters of the regression model

№	Показатель	Ед. изм.
X_1	Стоимость 1 барр. топлива	тыс. руб.
X_2	Количество перевалок топлива (по логистическому маршруту)	%
X_3	Проблема качества топлива (в процентах отклонения от норматива чистоты топлива в год)	%
Y	Чистый доход (экономия)	млн руб.

можно методами статистики, основу которых составляют построение и анализ соответствующей математической модели [10].

Считаем целесообразным дополнять результаты факторного анализа, для чего может быть использован аппарат экономико-математического моделирования [10–13]. Поэтому целью дальнейшего этапа исследования является анализ возможностей применения корреляционно-регрессионного анализа для оценки факторов оптимизации завоза авиатоплива путем оптимизации логистической схемы. На основе предложенной регрессионной модели могут быть выбраны наиболее оптимальные варианты развития топливного обеспечения Республики Якутия для воздушного транспорта в предстоящем периоде. Оценить результаты их действия возможно методами статистики, основу которых составляют построение и анализ соответствующей математической модели. В данном исследовании прогнозирование значений результативного показателя осуществляется на основе динамики его значений в прошлых периодах. С этой целью рассмотрим возможности применения корреляционно-регрессионного анализа, который позволит перейти от функциональной связи между факторами и результативным показателем в стохастической зависимости [14–16]. Зависимость оказывает больший эффект в условиях реальной экономики. Корреляционно-регрессионный анализ обеспечивает определение влияния факторов, для которых невозможно построить жесткую детерминированную факторную модель [14–17].

Для реализации принципов корреляционно-регрессионного анализа в рамках поставленной задачи требуется выполнение ряда условий:

- для построения уравнения регрессии необходима определенная совокупность объектов: в нашем исследовании – пространственно-временная (данные по поставкам авиационного топлива в Республику Якутия за 2019–2021 годы, которые распределялись по кварталам);
- необходим достаточный объем наблюдений (в связи с этим данные анализируются по кварталам, чтобы исключить влияние внешних факторов на оценочные показатели при значительной пролонгации);
- совокупность должна быть однородной.

В качестве результативного признака в работе был использован стоимостный показатель, который наилучшим образом позволяет отразить степень эффективности поставки авиационного топлива в Якутию. Для того чтобы выполнить условия вышеуказанных принципов проведения анализа, выбор факторов осуществлялся с учетом их однородного характера. Как видно из табл. 1, основным параметром оценки является экономический эффект, который достигается и рассчитывается как показатель чистой прибыли от организации логистического процесса на 1 барр. топлива (созависимая переменная). На степень корреляции данной зависимости влияют количественные факторы оценки эффективности x_2 для определения логистического фактора и x_3 для введения в модель параметра качества.

Таблица 2
Table 2

Значения параметров регрессионной модели
Values of the regression model parameters

№	Чистый доход (экономика)	Стоимость доставки 100 барр.	Количество перевалок на 1 барр.	Проблема качества
1	40200	39120	0,055	0,560
2	38450	36300	0,065	0,450
3	41150	40250	0,106	0,390
4	36269	34550	0,089	0,480
5	51350	49880	0,069	0,960
6	52500	49950	0,048	0,780
7	53900	52120	0,062	0,570
8	54919	53915	0,078	0,390
9	55200	23760	0,049	0,290
10	57150	52130	0,064	0,780
11	54150	51600	0,036	0,630
12	62900	59340	0,026	0,650

Использование регрессионного анализа позволило определить функцию, согласно которой было установлено влияние параметров модели на зависимую переменную Y (оценка чистого дохода). В общем виде уравнения регрессии, которые оцениваются, имеют следующий вид:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \quad (1)$$

Для определения коэффициентов регрессии модели в работе были использованы следующие первичные данные, отражающие текущее состояние производства (табл. 2). По результатам анализа удалось пропорционально распределить оценки влияния показателя качества x_2 по зависимому показателю Y на основании результатов статистических данных по ценам и логистике авиатоплива в северный регион. Линейная модель имеет следующий вид:

$$Y = 86373,60 + 82800X_1 + 59713,13X_2 + 46,6 X_3. \quad (2)$$

Анализ коэффициентов регрессии позволяет нам выяснить степень влияния факторов на исходную смену.

Графически, используя экспериментальные данные, в исследовании была проведена проверка наиболее значимых факторов, влияющих на результат, разделив их на изменяющиеся в зависимости от условий доставки и неизменяющиеся. После проведения центрирования данных (рис. 6) построена модель оценки стоимости, которая позволит смоделировать процесс доставки авиатоплива с учетом изменяющихся условий.

Обсуждение полученных результатов исследования

Как свидетельствуют результаты исследования, наибольший вес имеет такой показатель, как стоимость доставки 100 барр. $A = 0,4531$. Отличный знак коэффициента при показателе «Количество перевалок на 1 барр.» означает, что значительное увеличение в структуре стоимости приводит к снижению результативного показателя чистого дохода.

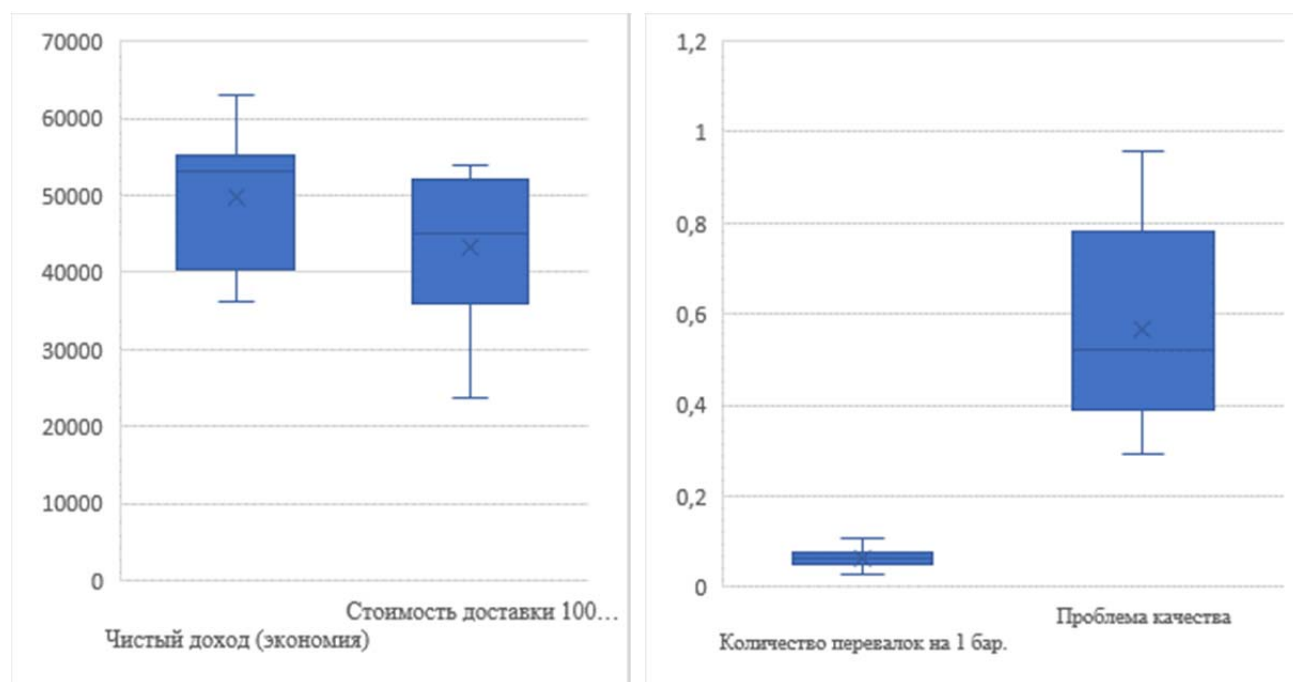


Рис. 6. Изменяющиеся факторы стоимости доставки топлива региона (в Якутске за период 2018–2021 гг.)
Fig. 6. Changing factors of the cost of fuel delivery in the region (in Yakutsk for the period 2018–2021)

Полученный коэффициент множественной корреляции и значения остаточной дисперсии показывают тесноту связи результативного показателя с факторными показателями, т. е. характеризуют качество выбора уровня регрессии. В нашем случае $R = 0,7714$, а показатели остаточной дисперсии факторов равны соответственно 0,5950. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что построенная нами модель отобрана правильно. Коэффициент детерминации указывает на долю влияния выбранных показателей на результативный показатель. В данном случае регрессия зависимого фактора на показатель модели объясняет 59,5 % вариативности значений Y . Значение этого показателя составляет 0,443. Поскольку полученный результат больше критического, то с вероятностью в 95 % можно утверждать о существенности связи между параметрами модели.

Факторная дисперсия характеризует вариацию результативного признака, которая объясняется факторами, которые вошли в модель. По результатам этого показателя нами были получены следующие значения этого показателя: $t_{\text{крит.}} = 3,72$.

Анализ полученных значений позволяет сделать вывод, что в среднем наиболее влиятельным фактором является такой показатель, как себестоимость перевозок топлива. Для оценки значимости полученных коэффициентов регрессии используется критерий t . Таким образом, полученные результаты моделирования позволяют не только спрогнозировать общие показатели оценки его деятельности, но и определить развитие предприятия в будущем. Чтобы показать значимость полученных результатов, представим графически статистическое распределение экспериментальных данных, чтобы проиллюстрировать наиболее значимые факторы, влияющие на результат. На рис. 6 разделим их на изменяющиеся в зависимости от условий доставки и неизменяющиеся. Для изменяющихся необходимо продумать интервал изменения. Затем, проведя центрирование данных, построить модель оценки себестоимости, которая позволила бы моделировать процесс доставки авиатоплива с учетом изменяющихся условий.

Для вычисления сглаженных уровней ряда Y_t применяется формула

Таблица 3
Table 3

Интервал сглаживания параметров регрессионной модели
Smoothing interval of the regression model parameters

t	Y Чистый доход (экономия)	x ₁ Стоимость доставки 100 барр.	x ₂ Количество перевалок на 1 барр.	x ₃ Проблема качества	Y(t)	S(t)ср.	S(t)вз.
1	40200	39120	0,055	0,560	130,0		
2	38450	36300	0,065	0,450	120,0	121,67	
3	41150	40250	0,106	0,390	115,0	130,33	123,14
4	36269	34550	0,089	0,480	156,0	153,33	155,14
5	51350	49880	0,069	0,960	189,0	171,67	179,40
6	52500	49950	0,048	0,780	170,0	175,33	173,69
7	53900	52120	0,062	0,570	167,0	180,67	178,23
8	54919	53915	0,078	0,390	205,0	183,33	175,18
9	55200	23760	0,049	0,290	178,0	186,33	171,14
10	57150	52130	0,064	0,780	167,0	193,33	
11	54150	51600	0,036	0,630	162,0		
12	62900	59340	0,026	0,650			

$$Y_t = \frac{\sum_{i=t-p}^{t+p} y_i}{x_n}, \text{ где } p - \text{вероятность изменения}$$

фактора по Y.

$$Y_t = \frac{\sum_{i=t-p}^{t+p} Y_i \cdot w_i}{\sum_{i=t-p}^{t+p} w_i}, \quad (3)$$

В результате такой процедуры получают-ся ($x_n - m + 1$) сглаженных значений уровней ряда; первые p и последние p уровней ряда теряются (не сглаживаются).

При четных значениях по t после проце-дуры сглаживания обычно поводят центри-рование полученного ряда (находят средние значения двух последовательных скользящих средних для определения зависимости фак-торов).

Рассмотрим двухфакторную линейную модель для x_2 «Количество перевалок топли-ва (по логистическому маршруту)» и x_3 «Проблема качества топлива (в процентах отклонения от норматива чистоты топлива в год)»:

где w_i – весовые коэффициенты, определя-емые методом наименьших квадратов, при этом выравнивание на каждом интерва-ле сглаживания осуществляется чаще все-го с применением полиномов второго или третьего порядков. Весовые коэффици-енты для интервала 5 будут следующие:

$\frac{1}{35}[-3, 12, 17, 12, -3]$. Выберем интервал сгла-живания $m = 5$ и проведем сглаживание взвешенной скользящей на второй степени, используя данные табл. 2.

В этом случае текущее значение времен-ного ряда принимается во внимание на осно-ве сглаживающей константы (веса), которая позволяет определить зависимые и независи-мые факторы. Поэтому проведем экспонен-циальное сглаживание временного ряда. Оцененное уравнение модели запишется:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + \varepsilon, \text{ откуда } A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y). \quad (4)$$

Введем матрицу:

$$X = \begin{pmatrix} 39120 & 0,055 & 0,560 \\ 36300 & 0,065 & 0,450 \\ 40250 & 0,106 & 0,390 \\ 34550 & 0,089 & 0,480 \\ 49880 & 0,069 & 0,960 \\ 49950 & 0,048 & 0,780 \\ 52120 & 0,062 & 0,570 \\ 53915 & 0,078 & 0,390 \\ 23760 & 0,049 & 0,290 \\ 52130 & 0,064 & 0,780 \\ 51600 & 0,036 & 0,630 \\ 59340 & 0,026 & 0,650 \end{pmatrix}; \quad X^T = \begin{pmatrix} 40200 & 38450 & 41150 & 36269 & 51350 & 52500 & 53900 & 54919 & 55200 & 57150 & 54150 & 62900 \\ 39120 & 36300 & 40250 & 34550 & 49880 & 49950 & 52120 & 53915 & 23760 & 52130 & 51600 & 59340 \\ 0,055 & 0,065 & 0,106 & 0,089 & 0,069 & 0,048 & 0,062 & 0,078 & 0,049 & 0,064 & 0,036 & 0,026 \end{pmatrix};$$

$$X^T \cdot X = \begin{pmatrix} 598138 & 542915 & 0,747 \\ 542915 & 138940 & 14550 \\ 0,747 & 14550 & 1741 \end{pmatrix}; \quad X^T \cdot Y = \begin{pmatrix} 1470 \\ 215940 \\ 25150 \end{pmatrix}.$$

Запишем систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} 598138a_0 + 542915a_1 + 0,747a_2 \\ 542915a_0 + 138940a_1 + 14550a_2 \\ 0,747a_0 + 14550a_1 + 1741a_2 \end{cases}$$

Найдем матрицу

$$(X^T \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,5734 & 0,002 & 0,1127 \\ 0,002 & 0,00006 & 0,006 \\ 0,1127 & 0,0006 & 0,0127 \end{pmatrix}.$$

$$\text{Тогда } A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) = \begin{pmatrix} 16,07 \\ 0,249 \\ -61,36 \end{pmatrix}.$$

Уравнение модели:

$$Y = -61,36x_3 + 0,25x_2 + 16,07x_1.$$

Таким образом, мы подтвердили, что фактор x_3 «Стоимость доставки 100 барр.» явля-

ется отрицательно зависимым и имеет наибольший критический вес, а значимость фактора x_2 «Проблема качества» не превышает весовое значение 0,25. А x_1 «Количество перевалок на 1 барр.» имеет весовое значение 16,07 как созависимый фактор с x_2 .

Это означает, что для Y на 16,07 % приращение прибыли можно объяснить только снижением стоимости доставки топлива x_1 и только на 0,25 % дополнительными вложениями в перевалочные пункты x_2 . Фактор качества является для модели независимым.

Заключение

Кроме фактора высокой конечной стоимости авиатоплива, также для устойчивого функционирования гражданской авиации по всей территории Республики Саха (Якутия) достаточно острым становится вопрос качественных показателей доставляемого авиатоплива, его удельной электропроводности. Обеспечение высоких требований по качеству авиатоплива затруднено прежде всего

сложной и многоэтапной схемой транспортировки с необходимостью многократной перекачки топлива со сменой нескольких видов транспорта, железнодорожного, водного и автомобильного, прежде чем топливо достигнет конечных пунктов назначения, где также оказывает влияние стареющая инфраструктура хранения авиатоплива.

В сложившихся транспортно-логистических условиях сложной схемы поставок авиатоплива в арктические районы Якутии и всего Крайнего Севера одним из возможных решений там, где для этого есть технологические возможности, для сохранения качественных показателей завозимого авиатоплива и повышения удельной объемной электропроводности при интенсификации технологических процессов перекачки и перевозки авиатоплива, является более широкое использование добавок от статического электричества в виде специальной присадки (СИГБОЛ) [18, 19].

В вопросе поиска путей снижения стоимости авиатоплива предлагается рассмотреть два альтернативных варианта совершенствования механизма возмещения сумм акциза, начисления при получении авиационного керосина авиаперевозчиками.

1. Снизить условное значение средней оптовой цены реализации авиационного керосина на территории РФ (Цкер ВР) на 2019 г. с 48300 до 40000 руб. за тонну (40000 руб/т – фактический уровень на декабрь 2017 г.) и далее ежегодно увеличивать значение Цкер ВР на уровень инфляции, установленный Росстатом, а не на фиксированные 5 %.

2. Внести в пункт 21 статьи 200 Налогового кодекса РФ изменения, предусматривающие повышение с 2,08 до 3,5 коэффициента суммы акциза и ставку акциза до уровня 3500 руб. за одну тонну, начисленной при получении авиационного керосина налогоплательщиком (ранее данный вариант уже предлагался АЭВТ и был поддержан Минтрансом России).

Для обоих вариантов в целях дополнительной компенсации затрат авиакомпаний на приобретение авиакеросина в аэропортах,

расположенных в Дальневосточном федеральном округе, установить в пункте 27 статьи 200 Налогового кодекса РФ значение Кдт комп равным 1,5.

Неотложное принятие данных мер будет способствовать значительному снижению затрат и улучшит экономику авиакомпаний, выполняющих полеты в самых непростых условиях Крайнего Севера, Якутии, Чукотки и поддерживающих авиатранспортную доступность населения всего Дальнего Востока как неотъемлемого и стратегически важнее региона Российской Федерации.

Список литературы

1. Емельянова А.В. Пути развития региональных маршрутов авиационных перевозок Красноярского края // Модернизация аэропортов и развитие авиаперевозок – 2020: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 16–17 апреля 2020 г. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 2020. С. 44–47.
2. Горшкова И.В., Клочков В.В. Экономические проблемы управления развитием авиатранспортной сети в малонаселенных регионах России // Управление большими системами. 2010. Вып. 30. С. 115–134.
3. Шведов А.С. Процентные финансовые инструменты: оценка и хеджирование. М.: ГУ-ВШЭ, 2001. 152 с.
4. Вдовенков А.А. Использование хеджирования в деятельности авиакомпаний для страхования рисков изменения цены авиатоплива // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 118. С. 153–155.
5. Горбунов В.П., Рухлинский В.М., Саввина А.М. Роль природных и антропогенных факторов в современном состоянии региональной авиации Арктики и Крайнего Севера // Наука и Бизнес: Пути развития. 2020. № 6 (108). С. 32–37.
6. Грядунов К.И. Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: тексты лекций. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. С. 184.

7. **Коняев Е.А., Грядунов К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горючесмазочных материалов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2013. 77 с.

8. **Спиркин В.Г.** Химмотология топлив: учеб. пособие / Под ред. И.Г. Фукса. М.: Нефть и газ, 2002. 182 с.

9. **Дубовкин Н.Ф.** Физико-химические и эксплуатационные свойства ракетных топлив: справочник / Н.Ф. Дубовкин, В.Г. Маланicheva, Ю.П. Массур, Е.П. Федоров. М.: Химия, 1985. 240 с.

10. **Бутакова М.М.** Экономическое прогнозирование: методы и приемы практических расчетов: учеб. пособие. 2-е изд., испр. М.: КНОРУС, 2010. 168 с.

11. **Харитонов Д.Е.** Корреляционно-регрессионный анализ в экономике // *Контентус*. 2016. № 8 (49). С. 176–179.

12. **Dhamodharavadhani S., Rathipriya R.** Variable selection method for regression models using computational intelligence techniques. In handbook: of Research on Machine and Deep Learning Applications for Cyber Security / In Ganapathi P., Shanmugapriya D. (Ed.). IGI Global, 2020. Pp. 416–436. DOI: 10.4018/978-1-5225-9611-0.ch019

13. **Просветов Г.И.** MBA: задачи и решения: учебно-практическое пособие. М.: Альфа-Пресс, 2010. 527 с.

14. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. 3-е изд. М.: Вильямс, 2007. 912 с.

15. **Magnello M.E.** Karl Pearson and the establishment of mathematical statistics // *International Statistical Review*. 2009. Vol. 77, iss. 1. Pp. 3–29. DOI: 10.1111/j.1751-5823.2009.00073.x

16. **Obuchowski N.A.** Multivariate statistical methods // *American Journal of Roentgenology*. 2005. Vol. 185, no. 2. Pp. 299–309. DOI: 10.2214/ajr.185.2.01850299

17. **Стрижов В.В., Крымова Е.А.** Методы выбора регрессионных моделей. М.: Вычислительный центр РАН, 2010. 60 с.

18. **Горюнова А.К.** Сравнительная оценка эффективности современных и перспективных противоизносных присадок к реактивным топливам / А.К. Горюнова, В.В. Кон-

дратенко, И.М. Никитин, В.В. Сузиков // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2016. № 225 (3). С. 45–48.

19. **Коняев Е.А., Грядунов К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горючесмазочных материалов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2016. 80 с.

References

1. **Emelyanova, A.V.** (2020). [*Ways of developing regional air transportation routes in the Krasnoyarsk territory*]. *Modernizatsiya aeroportov i razvitiye aviaperevozok – 2020: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet grazhdanskoj aviatsii, pp. 44–47. (in Russian)

2. **Gorshkova, I.V. & Klochkov, V.V.** (2010). [*Economic problems of managing the development of the air transport network in low-populated regions of Russia*]. *Upravleniye bolshimi sistemami*, issue 30, pp. 115–134. (in Russian)

3. **Shvedov, A.S.** (2001). [*Interest-bearing financial instruments: valuation and hedging*]. Moscow: GU-VShE, 152 p. (in Russian)

4. **Vdovenkov, A.A.** (2007). *Operating in the aviation industry is not an easy proposition in current times. Jet fuel prices are major component of operating costs and they are also one of the most volatile*. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 118, pp. 153–155. (in Russian)

5. **Gorbunov, V.P., Rukhlinskiy, V.M. & Savvina, A.M.** (2020). *The role of natural and anthropogenic factors in the modern state of the regional aviation of the Arctic and Far North*. *Nauka i Biznes: Puti razvitiya*, no. 6 (108), pp. 32–37. (in Russian)

6. **Gryadunov, K.I.** (2021). [*Chemmotology of aviation fuels and lubricants: lecture texts*]. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, pp. 184. (in Russian)

7. **Konyaev, E.A. & Grydunov, K.I.** (2013). [*Operational properties of aviation fuels and lubricants: Tutorial*]. Moscow: MGTU GA, 77 p. (in Russian)

8. Spirkin, V.G. (2002). [*Chemmotology of fuels: Tutorial*], in Fuks I.G. (Ed.). Moscow: Neft i gaz, 164 p. (in Russian)
9. Dubovkin, N.F., Malanicheva, V.G., Massur, Yu.P. & Fedorov, E.P. (1985). [*Physical, chemical and performance properties of rocket fuels: a handbook*]. Moscow: Khimiya, 240 p. (in Russian)
10. Butakova, M.M. (2010). [*Economical prediction: methods and techniques of practical calculations: Tutorial*]. 2nd ed., ispr., Moscow: KNORUS, 168 p. (in Russian)
11. Kharitonova, D.E. (2016). [*Correlation and regression analysis in economics*]. Contenus, no. 8 (49), pp. 176–179. (in Russian)
12. Dhamodharavadhani, S. & Rathipriya, R. (2020). *Variable selection method for regression models using computational intelligence techniques*. In handbook: of Research on Machine and Deep Learning Applications for Cyber Security, in Ganapathi P., Shanmugapriya D. (Ed.). IGI Global, pp. 416–436. DOI: 10.4018/978-1-5225-9611-0.ch019
13. Prosvetov, G.I. (2010). [*MBA: tasks and solutions: educational and practical guide*]. Moscow: Alfa-Press, 527 p. (in Russian)
14. Draper, N. & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis*. 3rd ed. Publisher: Wiley-Interscience, 736 p.
15. Magnello, M. (2009). *Karl Pearson and the establishment of mathematical statistics*. International Statistical Review, vol. 77, issue 1, pp. 3–29. DOI: 10.1111/j.1751-5823.2009.00073.x
16. Obuchowski, N.A. (2005). *Multivariate statistical methods*. American Journal of Roentgenology, vol. 185, no. 2, pp. 299–309. DOI: 10.2214/ajr.185.2.01850299
17. Strizhov, V.V. & Krymova, E.A. (2010). [*Methods of regression models selection*]. Moscow: Vychislitelnyy tsentr RAN, 60 p. (in Russian)
18. Goryunova, A.K., Kondratenko, V.V., Nikitin, I.M. & Suzikov, V.V. (2016). *Comparative evaluation of the effectiveness of current and future anti-wear additives to jet fuels*. Civil Aviation High Technologies, no. 225 (3), pp. 45–48. (in Russian)
19. Konyaev, E.A. & Grydunov, K.I. (2016). [*Operational properties of aviation fuel and lubricants: Tutorial*]. Moscow: MGTU GA, 80 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Горбунов Владимир Павлович, кандидат технических наук, генеральный директор АО «Авиакомпания "Якутия"», gorbunov.vladimir@yakutia.aero; vlad.gorbunov@bk.ru.

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Кузнецов Сергей Викторович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, s.kuznetsov@mstuca.aero.

Стручкова Анна Михайловна, кандидат технических наук, начальник отдела управления базы данных АО «Авиакомпания "Якутия"», доцент кафедры информационных технологий СВФУ им. М.К. Аммосова, stuchkova.am@yakutia.aero.

Information about the authors

Vladimir P. Gorbunov, Candidate of Technical Sciences, General Director of JSC “Yakutia Airlines”, Yakutsk, gorbunov.vladimir@yakutia.aero; vlad.gorbunov@bk.ru.

Vasiliy M. Samoylenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Sergey V. Kuznetsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The Head of Aircraft Electrical Systems and Avionics Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.kuznetsov@mstuca.aero.

Anna M. Struchkova, Candidate of Technical Sciences, The Head of the Data Base Control Division of JSC “Yakutia Airlines”, Yakutsk, Associate Professor of the Chair of Information Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, stuchkova.am@yakutia.aero.

Поступила в редакцию 31.01.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 31.01.2022
Accepted for publication 24.11.2022

УДК 656.7
DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-40-52

Обоснование рациональных требований к самолетам местных воздушных линий России на основе моделирования авиатранспортной системы с учетом перспективных критериев эффективности

С.Ф. Егошин¹, А.В. Смирнов¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы рационального выбора наиболее эффективных самолетов для местных авиалиний России в целях устранения транспортной дискриминации населения регионов РФ в части местного сообщения. В силу значительных финансовых затрат создание местных воздушных линий целесообразно только в тех субъектах РФ, где организация недорогого наземного сообщения невозможна: большая часть таких субъектов относится к труднодоступным территориям Северо-Западного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов России, и данная проблема может затрагивать интересы вплоть до 14 млн человек. Рассматривается задача минимизации суммарных затрат на организацию перспективной авиатранспортной системы местных перевозок (включая затраты на аэропортовую инфраструктуру) путем выбора рационального парка эксплуатируемых самолетов с учетом требований к качеству обслуживания пассажиров. Как критерий качества местной перевозки рассматривается максимальное время местной поездки. Приводятся результаты расчетов для трех- и четырехтипного парков воздушных судов. Показано, что применение современных самолетов с уровнем технического совершенства, соответствующим Pilatus PC-12NG, позволяет снизить уровень транспортной дискриминации почти до нулевых значений, в том числе при достаточно жестких ограничениях на максимальное время местной поездки 2 часа. При этом повышение крейсерской скорости до более чем 400 км/ч актуально только для самолетов вместимостью не более 9 пассажиров. Для более крупных самолетов (типа L-410) данный вопрос повышения скорости скорее второстепенен, поскольку данные воздушные суда обслуживают авиалинии протяженностью не более 800 км. При этом общий парк применяемых авиатранспортных средств оценивается в 250–300 воздушных судов. Полученные результаты могут быть использованы при формировании требований к перспективным самолетам местных воздушных линий.

Ключевые слова: транспортная доступность, местное сообщение, минимальный социальный транспортный стандарт, транспортная дискриминация населения, местные воздушные линии.

Для цитирования: Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Обоснование рациональных требований к самолетам местных воздушных линий России на основе моделирования авиатранспортной системы с учетом перспективных критериев эффективности // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 40–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-40-52

Justification of rational requirements for aircraft of Russian regional aviation based on modeling of the air transport system considering perspective efficiency criteria

S.F. Egoshin¹, A.V. Smirnov²

¹Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

Abstract: The article addresses the issues of judicious choice of the most efficient aircraft for regional aviation of Russia for the purpose of eliminating transport discrimination of the population of the Russian Federation regions in terms of local traffic. Due to the high financial costs, the development of regional aviation is viable only in those constituent entities of the Russian Federation where the development of low-cost ground transportation is not feasible: most of these Russian Federation regions are attributed

to the remote territories of the North-Western, Ural, Siberian and Far Eastern Federal Districts of Russia, therefore, this concern may affect the perspectives of up to 14 million people. The problem of minimizing the total costs to develop an advanced air transport system of local transportation (including airport infrastructure costs) is considered by selecting a well-targeted fleet of operated aircraft, taking into consideration the requirements for the quality of passenger service. The maximum local travel time is regarded as a quality criterion of local transportation. The calculation results for three- and four-type aircraft fleets are given. It is shown that the use of modern high-technology aircraft similar to the Pilatus PC-12NG allows us to reduce the level of transport discrimination almost to zero values, including sufficiently strict restrictions regarding the maximum local travel time of “2 hours”. At the same time, the increase of cruising speed up to more than 400 km/h is relevant specifically for aircraft with a capacity of no more than 9 passengers. For larger aircraft (type L-410), the issue of increasing speed is rather minor, since these aircraft are operated on flight distances of no more than 800 km. Concurrently, the total fleet of air transport vehicles in service amounts to 250–300 aerial vehicles. The obtained results can be used to specify the requirements for the advanced aircraft of local airlines.

Key words: transport accessibility, domestic air service, minimum social transport standard, transport discrimination of population, local airlines.

For citation: Egoshin, S.F. & Smirnov, A.V. (2022). Justification of rational requirements for aircraft of Russian regional aviation based on modeling of the air transport system considering perspective efficiency criteria. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 40–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-40-52

Введение

Настоящая работа посвящена поиску рациональных требований к самолетам местных воздушных линий (МВЛ), которые способствовали бы снижению затрат на организацию местного авиасообщения в отдаленных и труднодоступных районах России при одновременном повышении качества обслуживания пассажиров. Актуальности решения данной проблемы посвящено достаточно много современных работ [1–7]. МВЛ не являются коммерчески привлекательным видом деятельности в силу значительных затрат на перевозку одного пассажира [8]. Однако повышение качества воздушного сообщения, в том числе благодаря государственной поддержке, отмечается как непереносимое условие перехода к перспективной российской авиатранспортной системе (АТС), отвечающей установленным социальным стандартам транспортной доступности [9–12]. Аналогичный подход характерен и для зарубежных стран, в которых большая площадь территории в сочетании с низкой плотностью населения приводит к возникновению проблемы повышения уровня жизни [13, 14].

В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года одним из требований к качеству перевозки как предоставляемой услуги указано время совершения поездки. Ранее было показано [15], что в ка-

честве подобного требования может быть введен так называемый минимальный социальный транспортный стандарт (МСТС), который в числе прочих параметров может определять максимальную продолжительность поездки $T_{\text{МСТС}}$ в местном сообщении – время поездки из любого населенного пункта субъекта РФ (в данной работе административного центра района) в его столицу (областной центр).

Введение в рассмотрение МСТС приводит к разбиению территории региона на три зоны (в общем случае, рис. 1):

- зона 1 (ближняя к столице региона), где организация местного сообщения возможна с учетом соблюдения МСТС, с применением наземных или водных видов транспорта как наиболее экономичных;
- зона 2, где соблюдение МСТС невозможно при организации местного сообщения с применением только наземного (водного) транспорта, однако данный стандарт может быть выполнен при организации МВЛ;
- зона 3, где соблюдение МСТС невозможно даже при задействовании авиации.

К субъектам РФ, где необходима организация МВЛ, могут быть отнесены: республики Бурятия, Алтай, Коми, Саха (Якутия), Хакасия; Алтайский, Красноярский, Приморский, Хабаровский, Камчатский, Забайкальский края; Амурская, Архангельская, Вологодская, Иркутская, Костромская, Магадан-



Рис. 1. Разбиение территории региона на зоны при введении МСТС
Fig. 1. The zone segmentation of a regional territory using the standard MSTC

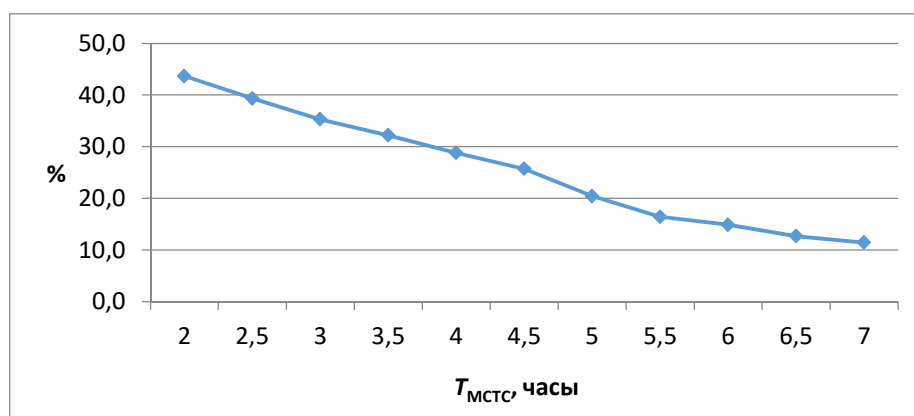


Рис. 2. Доля населения в отдаленных регионах России, подверженного транспортной дискриминации в местном сообщении в отсутствие МВЛ
Fig. 2. The proportion of the population in remote regions of Russia subjected to transport discrimination in domestic air service in the absence of local airlines

ская, Мурманская, Новосибирская, Омская, Оренбургская, Сахалинская, Томская, Тюменская области, а также рассматриваемые отдельно Ненецкий, Долгано-Ненецкий, Ханты-Мансийский, Чукотский, Ямало-Ненецкий округа. Численность населения, проживающего в этих регионах, по данным на 2015 год, составляет более 32 млн человек. На рис. 2 представлено изменение доли населения, подверженного в этих регионах транспортной дискриминации в местном сообщении в отсутствие МВЛ.

Как можно видеть из рис. 2, в зависимости от T_{MSTC} в зоны 2 и 3 попадает 10–40 % населения. Иными словами, организация местных перевозок с уровнем качества, удовлетворяющим МСТС, может затрагивать

интересы 3–14 млн человек. Для этой части населения, в силу географических размеров и сложных природно-климатических факторов в регионе, зачастую единственным приемлемым решением будет организация МВЛ. Отсюда организация МВЛ является государственной задачей, требующей выработки наиболее рациональных решений с точки зрения затрат.

Модель затрат авиатранспортной системы, исходные данные

Уточнение требований к перспективным воздушным судам (ВС) местных авиалиний выполняется в рамках т. н. прямого самолет-

ного сценария перевозок пассажиров на МВЛ, при котором между областным аэропортом и удаленными региональными аэропортами (в рамках модели – расположенными в районных административных центрах) организуются

прямые беспосадочные рейсы. В качестве ВС рассматриваются только самолеты как более экономичный тип по сравнению с вертолетами. Упрощенная функция затрат за период времени подобной АТС имеет вид

$$C_{\Sigma} = \min \sum_i \sum_j \left(C_{PEЙCj}(x_i, L_i) \times n_{PEЙCj}(x_i, L_i) + C_{АПj}(l_i) \right), \quad (1)$$

где суммирование по i соответствует сумме затрат по всем местным авиалиниям;

суммирование по j соответствует количеству типов ВС в парке;

x_i, L_i – пассажиропоток и протяженность рассматриваемой i -й авиалинии соответственно;

$C_{PEЙCj}$ – стоимость рейса j -го ВС;

$n_{PEЙCj}$ – количество рейсов j -го ВС на линии;

$C_{АПj}(l)$ – затраты на аэропорт для j -го ВС в зависимости от длины ВПП l_i .

Здесь

$$n_{PEЙCj}(x_i, L_i) = 365 / t_{PEГ} \times \left\lceil \frac{x_i}{365 / t_{PEГ} \times N_j(L_i)} \right\rceil, \quad (2)$$

где $t_{PEГ}$ – регулярность рейсов, задаваемая нормативно как результат государственной политики в сфере регулирования местных авиаперевозок;

$N_j(L_i)$ – вместимость j -го ВС в зависимости от протяженности авиалинии;

округление вверх $\lceil \rceil$ – соответствует количеству рейсов.

Выборка авиалиний соответствует районам, попадающим в зоны 2 и 3. Граница между зонами 1 и 2 определяется из условия

$$\frac{L_i}{V_{наз}} \leq T_{МТС}, \quad (3)$$

где $V_{наз}$ – скорость движения наземных транспортных средств типа автобус (задавалась равной 50 км/ч). Считается, что для осуществления местной перевозки между районным центром, попадающим в зону 1, и центром субъекта РФ организация МВЛ не требуется.

При невыполнении же условия (3) полагается, что местная авиалиния должна существовать. Если при этом для некоторого j -го ВС в парке выполняется условие (зона 2)

$$\frac{L_i}{V_j} + \Delta t_j \leq T_{МТС}, \exists j, \quad (4)$$

то считается, что для соответствующего пассажиропотока x_i норматив $T_{МТС}$ выполняется (здесь V_j – крейсерская скорость j -го ВС, Δt_j – поправочное время, связанное с выполнением наземных операций, взлетом/посадкой, набором высоты и т. д.). Если же условие (4) не выполняется для любого ВС в парке, x_i включается в множество пассажиров $\{x_i^0\}$, подверженных дискриминации (зона 3).

Ранее, в [15] уровень транспортной дискриминации задавался как отношение суммарного пассажиропотока на множестве пассажиров $\{x_i^0\}$ к общей численности населения регионов, где организуется местное сообщение. В настоящей работе предлагается средний уровень транспортной дискриминации рассчитывать следующим образом:

$$Z = \frac{\sum x_i^0}{\sum x_i}. \quad (5)$$

Таблица 1
Table 1

Технико-экономические характеристики рассматриваемых ВС
Technical and economic characteristics of the aerial vehicles under consideration

	Ед. изм.	М-101Т «Гжель»	«Рысачок»	L-410UVP-E	PC-12NG
Экипаж	чел.	1	2	2	1
Кол-во двигателей	шт.	1	2	2	1
Тип двигателей		M601	M601	M601	PT6A-67
Удельный расход топли- ва 1 двигателя	кг/кВт·ч	0,395	0,395	0,395	0,3
Максимальная взлетная масса	кг	3270	5000	6600	4740
Масса пустого	кг	2020	2770	4050	2800
Максимальная полезная нагрузка	кг	540	1570	1800	1209
Крейсерская скорость	км/ч	380	270	300	480
Максимальное количе- ство пассажиров	чел.	6	9	19	9
Дальность полета при максимальной полезной нагрузке	км	900	1525	450	2000
Стоимость ВС	млн долл.	1,8	2,0	5,0	4,4
Назначенный ресурс	л. ч.	15000	15000	20000	20000
Потребная длина ВПП	м	900	770	1000	1067

Такое определение уровня транспортной дискриминации представляется более корректным, поскольку оно отражает качество организации именно авиасообщения.

Расчет прочих величин, входящих в (1) (стоимости рейса ВС МВЛ, пассажиропотоков, затрат на аэропортовую инфраструктуру), подробно изложен в [16] и строится на основе доступных статистических данных. В частности, в качестве основных варьируемых составляющих стоимости летного часа ВС берутся затраты на топливо, фонд оплаты труда летного персонала, стоимость владения, затраты на техобслуживание и ремонт. При этом, поскольку потребный парк ВС рассматриваемой АТС составит несколько сотен самолетов [9, 17], влиянием масштаба парка ВС на стоимость его эксплуатации можно в первом приближении пренебречь. Касательно инфраструктуры учитывается наличие в рай-

онном центре аэропорта МВЛ (при необходимости – с затратами на удлинение взлетно-посадочной полосы) или же его строительство с амортизацией затрат за период до капитального ремонта.

Также вводится дополнительное ограничение: если суточный пассажиропоток авиалинии в одну сторону достигает 40 человек (это условно соответствует региональному самолету), она исключается из выборки, поскольку такую авиалинию выгоднее обслуживать более крупными ВС (вместимостью более 19 пассажиров).

Моделирование проводится в ценах 2015 г. (в т. ч. пересчет курса доллара США).

В качестве варьируемого параметра АТС рассматривается норматив времени $T_{\text{МТС}}$ совершения поездки из районного аэропорта в аэропорт центра субъекта РФ. Время на совершение наземного этапа поездки (т. е. от

аэропорта до населенных пунктов) не учитывается. Другой норматив $t_{PEГ}$ задается для перспективной АТС фиксированным и равным 1 рейс/день [11].

В вышеуказанной постановке задачи входящие в (1) параметры становятся независимыми, что существенно облегчает ее решение, позволяя для каждой авиалинии выбирать то ВС, при котором достигается минимум затрат на авиалинии с учетом затрат на инфраструктуру. Варианты АТС рассчитываются на основе парка следующих самолетов МВЛ (табл. 1)^{1,2,3,4}.

Результаты моделирования

В процессе моделирования при различных значениях времени поездки $T_{МСТС}$ учитываются два критерия эффективности АТС: уровень транспортной дискриминации Z и суммарные затраты на создание и функционирование АТС. Причем уровень транспортной дискриминации считается приоритетным.

При заданном стандарте времени поездки $T_{МСТС}$ общими для всех вариантов АТС, т. е. независимо от выбора парка ВС и наземной инфраструктуры, будут объемы авиаперевозок и структура сети (рис. 3–4).

Как и следовало предполагать (рис. 3–4), ужесточение стандарта $T_{МСТС}$ ведет к росту количества авиалиний и количества перевозимых авиапассажиров, что обусловлено ростом количества районных административных центров, обслуживаемых АТС.

Особенности структуры оптимизированной АТС представлены на рис. 5–6.

Основное количество рейсов (рис. 5) осуществляется самолетами небольшой вместительности, что в первую очередь связано с заданным стандартом обслуживания $t_{PEГ} = 1$ рейс/день. При этом наблюдается достаточно четкое разделение рейсов на две группы: протяженностью до 800 км и более 800 км как границы применения L-410. Такая особенность разбиения связана прежде всего с уменьшением плотности населения с удалением от столицы. Отсюда, если считать, что наиболее рациональное значение МСТС – это 4 часа [15], тогда согласно формуле (4) увеличение крейсерской скорости до значений более 400 км/ч имеет первостепенное значение только для ВС вместительностью не более 9 мест.

Анализ рис. 6 показывает, что с ужесточением МСТС рост численности ВС, как очевидное следствие роста количества обслуживаемых пассажиров, происходит неравномерно для разных типов ВС. Это связано как с сокращением времени поездки (замена на ВС с большей скоростью полета), так и с ростом пассажиропотока (замена на ВС с большей пассажироместимостью). Сравнение численностей в парке 9-местных самолетов (PC-12 и «Рысачок») показывает, что PC-12 с крейсерской скоростью, значительно превосходящей крейсерскую скорость «Рысачка», вытесняет последний из парка. В целом же доля самолета PC-12 в парке при $T_{МСТС} \geq 4,5$ часа превышает 50 %.

Эффективность применения самолета PC-12 может быть продемонстрирована путем расчета показателей АТС при наличии данного ВС и при его отсутствии в парке (рис. 7–8).

В обоих случаях (рис. 7) уровень транспортной дискриминации Z оказывается невысоким даже при достаточно жестких значениях МСТС. Это говорит о том, что построение перспективной АТС на основе современных самолетов МВЛ позволяет в значительной степени решить проблему транспортной доступности населения в отдаленных и труднодоступных районах страны при наличии достаточного финансирования. Хотя с ужесточением МСТС все больше пассажиров попадает в зону 3, общее их количество невелико:

¹ Техническое предложение на самолет «Рысачок» НКФ «Техноавиа» [Электронный ресурс] // airwar.ru. 2007. URL: <http://www.airwar.ru/enc/la/rysachok.html> (дата обращения: 12.03.2022).

² РЛЭ самолета М-101Т «Гжель». М., 2002. 364 с.

³ РЛЭ самолета L-410UVP-E20. Министерство Гражданской авиации СССР, 1985. 286 с.

⁴ Pilatus PC-12 NG. Just the facts [Электронный ресурс] // Pilatus Aircraft Ltd., P.O. Box 992, 6371 Stans, Switzerland. URL: <http://www.westair.com/wp-content/uploads/2013/12/Just-the-Facts.pdf> (дата обращения: 12.03.2022).

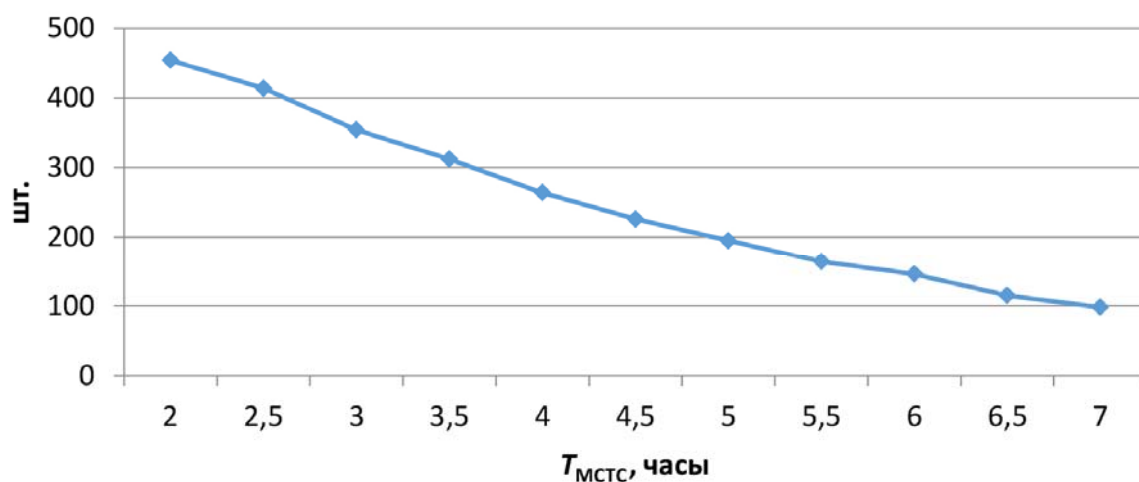


Рис. 3. Количество авиалиний
Fig. 3. The amount of airlines

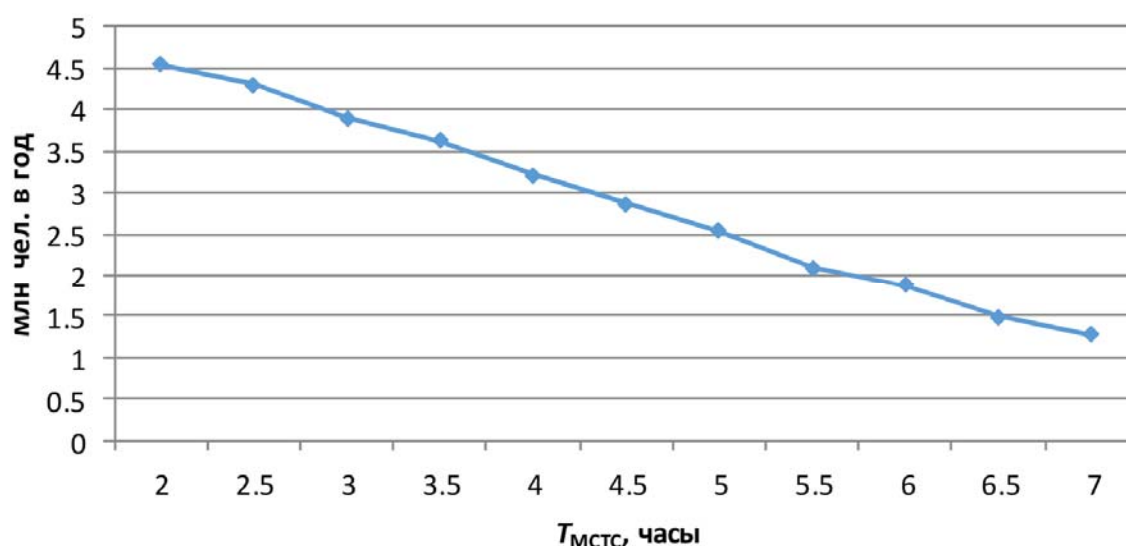


Рис. 4. Количество перевезенных пассажиров
Fig. 4. Passenger traffic

например, для трехтипового парка при $T_{MCTC} = 4$ часа транспортной дискриминации будут подвергаться 42 тыс. пассажиров, а при $T_{MCTC} = 2$ часа это количество возрастет всего в ≈ 5 раз. Применение же более скоростного РС-12 приводит к уменьшению уровня транспортной дискриминации почти до нулевого значения вплоть до достаточно жесткого ограничения на время поездки $T_{MCTC} = 3$ часа.

Также в обоих случаях (рис. 8) уменьшение удельных затрат на перевозку одного пассажира при ужесточении МСТС вплоть до

$T_{MCTC} = 3,5$ часа связано с увеличением в парке количества более вместительных L-410. Рост удельных затрат на перевозку одного пассажира при дальнейшем ужесточении МСТС вызван необходимостью замены части самолетов L-410 на более скоростные, но менее вместительные М-101 или РС-12.

В то же время, несмотря на кратное увеличение стоимости РС-12 относительно аналогичного по вместимости «Рысачка», уменьшение удельных затрат на перевозку одного пассажира при применении РС-12 до-

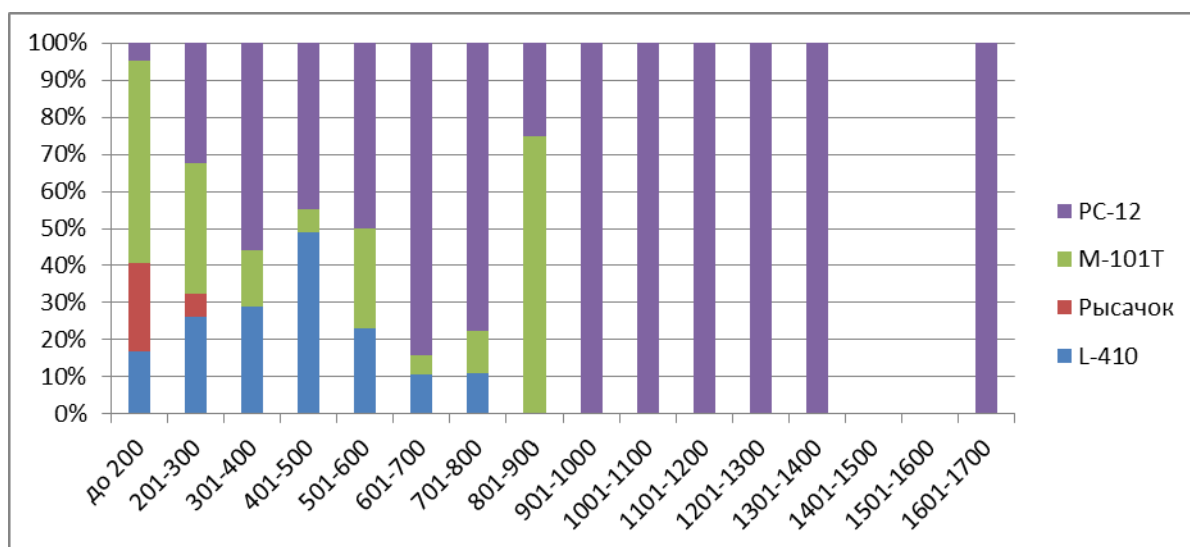


Рис. 5. Распределение количества парных рейсов по дальности авиалинии (км) при ТМСТС = 2 часа
Fig. 5. Distribution of the paired flights amount based on the airline range (km) with TMSTS = 2 hours

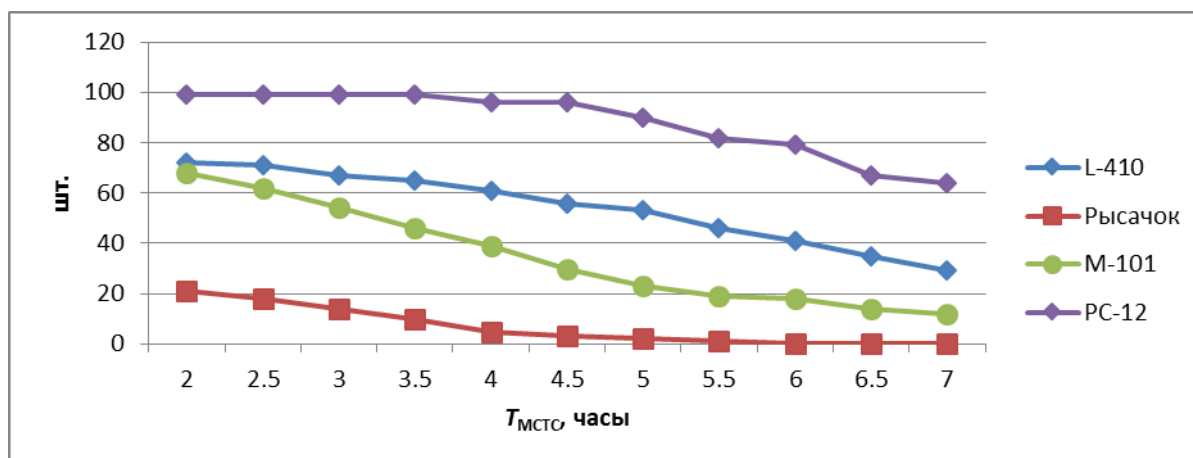


Рис. 6. Потребное количество ВС
Fig. 6. The required amount of aerial vehicles

стигается за счет (см. табл. 1) улучшения топливной эффективности, снижения численности экипажа (один пилот вместо двух), увеличения назначенного ресурса. Соответствующие данным факторам затраты, отнесенные к меньшему полетному времени (благодаря большей крейсерской скорости), дают общее снижение затрат на 3–8 %, даже несмотря на увеличение затрат на инфраструктуру, обусловленное большей потребной длиной ВПП самолета PC-12. Кроме того, наличие в парке PC-12 уменьшает суммарное

потребное количество ВС, делая их применение более эффективным с точки зрения количества перевезенных пассажиров на одно воздушное судно (причина вытеснения M-101 и L-410).

Выбор аэропортов и структура общих затрат в АТС для обоих парков различаются слабо и могут быть проиллюстрированы на примере четырехтипового парка (рис. 9–10).

С ужесточением МСТС количество задействованных в перевозках новых аэропортов растет значительно быстрее, чем задейство-

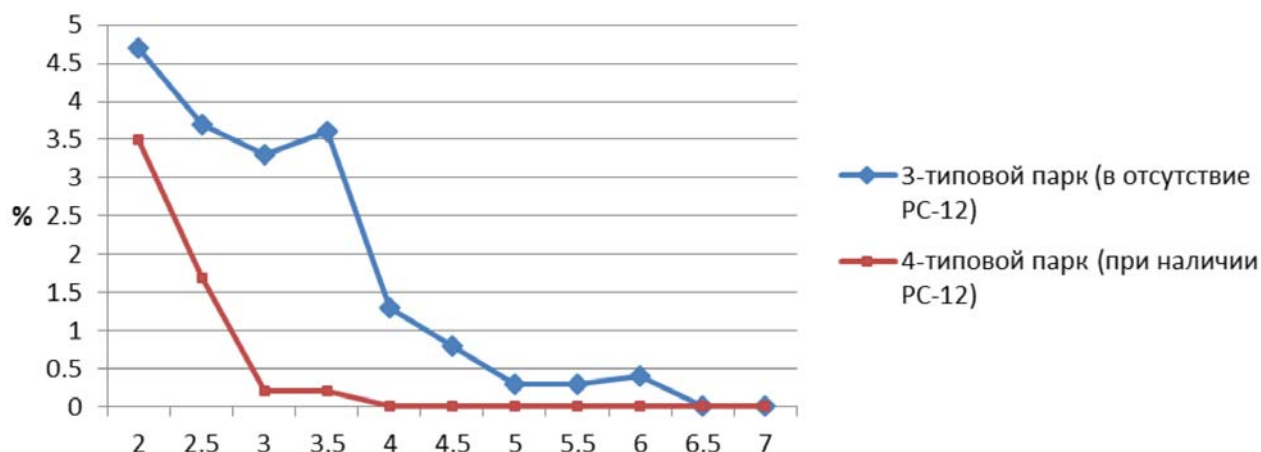


Рис. 7. Изменение уровня транспортной дискриминации Z
Fig. 7. Change in transport discrimination level Z

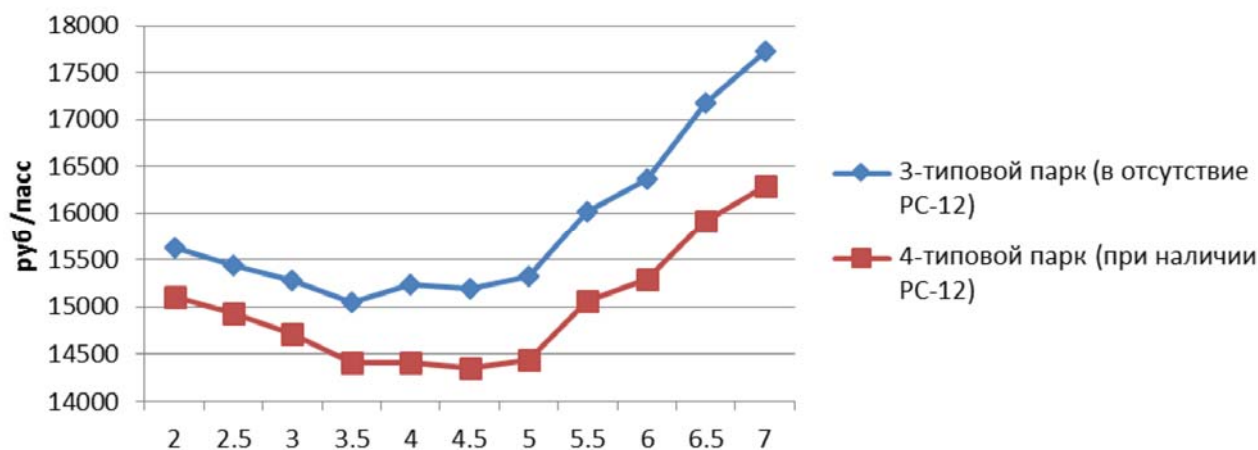


Рис. 8. Изменение удельных затрат на перевозку пассажира
Fig. 8. Change in the costs per unit of passenger transportation

ванных существующих (рис. 9). Это обусловлено следующим: чем ближе к столице находится район, тем более развиты в настоящее время другие, неавиационные типы местных перевозок; ужесточение же стандарта потребует в этой зоне дальностей дополнительного развития инфраструктуры именно авиационного транспорта.

Возрастание доли затрат на инфраструктуру (рис. 10) связано именно с ростом количества районных аэропортов. Эта доля в общих затратах на организацию АТС увеличивается с 35 % при $T_{\text{МСТС}} = 7$ часов до > 50 % при $T_{\text{МСТС}} = 2$ часа.

Заключение

Обеспечение транспортной доступности населения в отдаленных и труднодоступных районах страны может затрагивать интересы большого количества граждан РФ: без применения авиации и при достаточно жестком ограничении на максимальное время поездки «2 часа» транспортной дискриминации было бы подвергнуто около 40 % населения этих субъектов РФ, т. е. почти 14 млн человек.

В то же время использование современных ВС позволяет организовать авиатранспортную систему МВЛ в субъектах России,

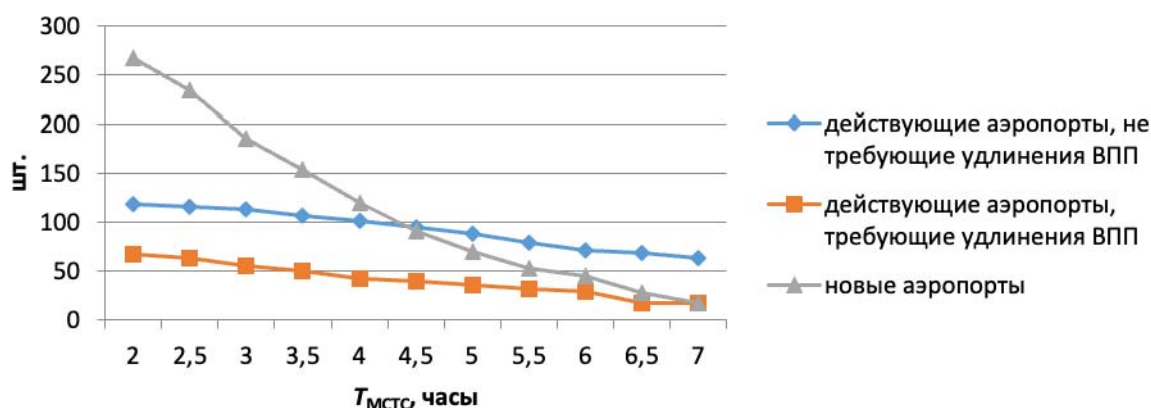


Рис. 9. Количество аэропортов МВЛ при 4-типовом парке
Fig. 9. The amount of local airports with four-type fleet

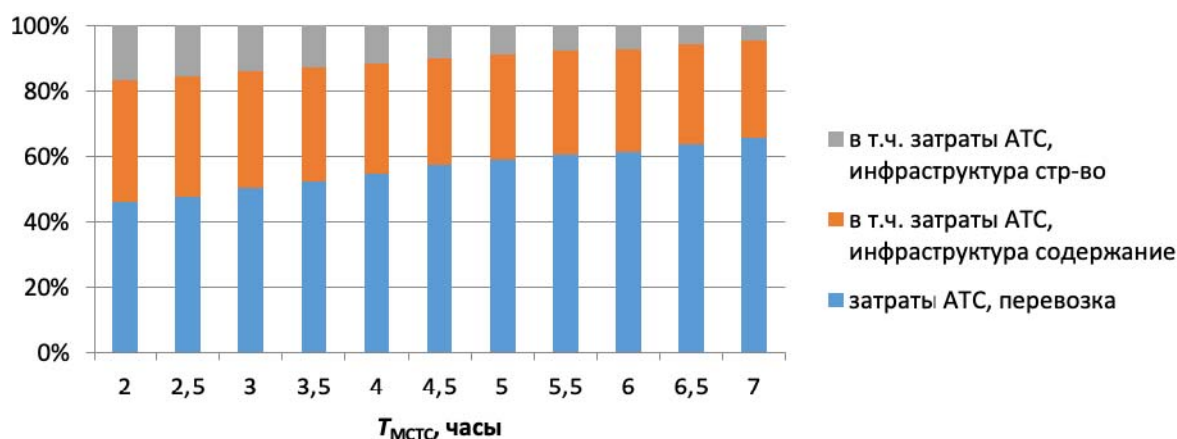


Рис. 10. Структура суммарных затрат в АТС по всем регионам
Fig. 10. The structure of total costs of the air transport system for all the regions

при которой количество дискриминируемых пассажиров будет невелико даже при самом жестком ограничении на максимальное время поездки (2 часа). При этом скорость крейсерского полета ВС МВЛ является определяющей с точки зрения полного устранения транспортной дискриминации: как показали результаты моделирования, при использовании более скоростного самолета PC-12NG удастся значительно уменьшить уровень транспортной дискриминации, а при ужесточении ограничения на максимальное время поездки до 3 часов устранить ее полностью.

Непосредственно АТС МВЛ должна быть выстроена по следующему принципу: менее

скоростные 19-местные самолеты обслуживают только те районные центры, которые расположены в пределах 800 км от центра субъекта РФ; более удаленные районные центры обслуживаются только более скоростными самолетами небольшой вместимости. Оценка потребного количества самолетов в парке АТС МВЛ при ограничении на максимальное время поездки 2 часа составила 250–300 ВС. Данная оценка численности выработана для существующих условий, а с ростом доходов населения отдаленных и труднодоступных районов субъектов РФ подвижность населения может вырасти, что приведет к росту пассажиропотоков и потребности в дополнительных ВС.

Другими возможными путями повышения качества обслуживания, кроме повышения крейсерской скорости ВС, могут быть применение в отдаленных районах более скоростного подвозящего транспорта (наземного или вертолетного) или сокращение дальности поездки подвозящего транспорта. В обоих случаях это приведет к увеличению суммарных затрат на организацию местных перевозок. В первом случае – поскольку вертолетный транспорт является заведомо более дорогим, чем наземный. Во втором случае – поскольку для выполнения ограничения на максимальное время поездки потребуется увеличить количество удаленных аэропортов МВЛ. Впрочем, в этом случае уменьшится количество населенных пунктов, обслуживаемых одним удаленным аэропортом МВЛ, что приведет к неминуемому уменьшению пассажиропотоков и, как следствие, к изменению количественного и качественного состава парка ВС и потребует проведения дополнительных исследований.

Список литературы

1. Киселенко А.Н., Малащук П.А., Фомина И.В. Исследование транспортной доступности европейского и приуральского севера России на основе модифицированного показателя Энгеля // Региональная экономика: теория и практика. 2019. Т. 17, № 9 (468). С. 1668–1680. DOI: 10.24891/re.17.9.1668
2. Клочкин В.В., Рождественская С.М., Фридлянд А.А. Обоснование приоритетных направлений развития авиационной техники для местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20 (331). С. 93–102.
3. Неретин А.С. Транспортная связанность и освоенность Восточных регионов России / А.С. Неретин, М.В. Зотова, А.И. Ломакина, С.А. Тархов // Известия РАН. Серия Географическая. 2019. № 6. С. 35–52. DOI: 10.31857/S2587-55662019635-52
4. Poleshkina I.O., Gorbunov V.P. Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. Pp. 443–451. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071
5. Соболев Л.Б. Большая миссия малой авиации // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 3 (450). С. 4–16.
6. Просвирина Н.В. Анализ проблем малой авиации в России и возможные пути их решения // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 28 (2). С. 232–238. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107
7. Панкратова А.Р. Проблемы развития авиaperевозок в дальневосточном регионе // Экономика и управление. 2015. № 12 (122). С. 23–28.
8. Волосов Е.Н. Региональная авиация Сибири и Дальнего Востока // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2016. № 4 (26). С. 60–68.
9. Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Формирование перспективной сети местных воздушных линий России // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 170–176.
10. Лесничий И.В. Предложения по развитию сети региональных авиaperевозок / И.В. Лесничий, М.А. Бородин, В.И. Самойлов, Г.А. Бритван // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2013. № 3 (314). С. 107–112.
11. Дутов А.В., Клочкин В.В., Рождественская С.М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и ее регионов // Россия: тенденции и перспективы развития: сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Регионы России: стратегии и механизмы модернизации, инновационного и технологического развития». Москва, 06–07 июня 2019 г. Москва: ИНИОН РАН, 2019. Т. 14. Часть 2. С. 43–48.
12. Фаузер В.В. Демографический потенциал северных регионов России – фактор и условие экономического освоения Арктики // Экономика региона. 2014. № 4 (40). С. 69–81. DOI: 10.17059/2014-4-5
13. Baker D., Merkert R., Kamruzzaman M. Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in

Australia // Journal of Transport Geography. 2015. Vol. 43. Pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.02.001

14. Fiser A., Fournier S. Study on addressing the infrastructure needs of northern aboriginal communities. The Conference Board of Canada, Ottawa, 2014. 94 p.

15. Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Авиа-транспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 78–90. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-78-90

16. Дунаевский А.И., Егошин С.Ф., Ключков В.В. Оценка влияния основных проектных параметров самолетов на стоимость перевозок в авиатранспортной системе местных воздушных линий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2021. № 9. С. 15–22.

17. Самойлов И.А. Мониторинг состояния и потребности рынка региональных и местных авиаперевозок в современных самолетах / И.А. Самойлов, М.А. Бородин, Д.А. Кипчарский, О.Ю. Страдомский // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2013. № 3. С. 98–106.

References

1. Kisilenko, A.N., Malashchuk, P.A. & Fomina, I.V. (2019). *Studying the transport accessibility of the European and Cis-Ural regions in the North of Russia based on a modified Engel's coefficient*. Regional Economics: Theory and Practice, vol. 17, no. 9 (468), pp. 1668–1680. DOI: 10.24891/re.17.9.1668 (in Russian)

2. Klochkov, V.V., Rozhdestvenskaya, S.M. & Fridlyand, A.A. (2018). *The reasoning of priority directions of aircraft development for local airlines*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 20 (331), pp. 93–102. (in Russian)

3. Neretin, A.S., Zotova, M.V., Lomakina, A.I. & Tarkhov, S.A. (2019). *Transport connection and development of the eastern re-*

gions of Russia. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya, vol. 6, pp. 35–52. DOI: 10.31857/S2587-55662019635-52 (in Russian)

4. Poleshkina, I.O. & Gorbunov, V.P. (2021). *Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia*. Transportation Research Procedia, vol. 57, pp. 443–451. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071

5. Sobolev, L.B. (2016). *A high mission of general aviation*. Economic Analysis: Theory and Practice, no. 3 (450), pp. 4–16. (in Russian)

6. Prosvirina, N.V. (2020). [Analysis of light aircraft problems in Russia and possible ways of their solution]. Natural humanitarian studies, no. 28 (2), pp. 232–238. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107 (in Russian)

7. Pankratova, A.R. (2015). *Problems of air transportation in the Russian Far East*. Economics and Management, no. 12 (122), pp. 23–28. (in Russian)

8. Volosov, E.N. (2016). *Regional aviation on Siberia and Far East: challenges and opportunities*. Issues of Social-Economic Development of Siberia, no. 4 (26), pp. 60–68. (in Russian)

9. Balashov, V.V., Smirnov, A.V. & Tseitlina, T.O. (2013). [Formation of a promising network of local airlines in Russia]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva, no. 2, pp. 170–176. (in Russian)

10. Lesnichiy, I.V., Borodin, M.A., Samoylov, V.I. & Britvan, G.A. (2013). *Proposals of development network of regional air transport*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 3, pp. 107–112. (in Russian)

11. Dutov, A.V., Klochkov, V.V. & Rozhdestvenskaya, S.M. (2019). [Measurement and regulation of transport connectivity and quality of transport services of the country and its regions]. Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya: sbornik trudov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Regiony Rossii: strategii i mekhanizmy modernizatsii, innovatsionnogo i tekhnologicheskogo razvitiya». Moscow: INION RAN, vol. 14, part 2, pp. 43–48. (in Russian)

12. Fauzer, V.V. (2014). *Demographic potential of the Russia's northern regions as a factor and condition of economic development of the Arctic*. Economy of Region, no. 4 (40), pp. 69–81. DOI: 10.17059/2014-4-5 (in Russian)

13. Baker, D., Merkert, R. & Kamruzzaman, M. (2015). *Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia*. Journal of Transport Geography, vol. 43, pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.02.001

14. Fiser, A. & Fournier, S. (2014). *Study on addressing the infrastructure needs of northern aboriginal communities*. The Conference Board of Canada, Ottawa, 94 p.

15. Egoshin, S.F. & Smirnov, A.V. (2018). *Air transport accessibility and transport discrimination of population in constituents of the*

Russian Federation. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 78–90. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-78-90 (in Russian)

16. Dunaevsky, A.I., Egoshin, S.F. & Klochkov, V.V. (2021). *Assessment of the impact of the main design parameters of aircraft on the cost of transportation in the air transport system of local air lines*. All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight"), no. 9, pp. 15–22. (in Russian)

17. Samoylov, I.A., Borodin, M.A., Kipcharskiy, D.A. & Stradomskiy, O.Y. (2013). *Monitoring the condition and needs of the market of regional and local air transport in a modern aircraft*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 3, pp. 98–106. (in Russian)

Сведения об авторах

Егошин Сергей Федорович, инженер ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», sergey4791@yandex.ru.

Смирнов Андрей Валентинович, кандидат технических наук, начальник отдела ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», smirnov@tsagi.ru.

Information about the authors

Sergey F. Egoshin, Engineer, FAI, Central Aerohydrodynamic Institute, sergey4791@yandex.ru.

Andrey V. Smirnov, Candidate of Technical Sciences, The Head of the Department, FAI, Central Aerohydrodynamic Institute, smirnov@tsagi.ru.

Поступила в редакцию 16.06.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 16.06.2022
Accepted for publication 24.11.2022

УДК 621.438-226.739.6

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом

В.М. Самойленко¹, Г.Т. Пашенко², Е.В. Самойленко¹,
В.В. Шестаков³

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
г. Москва, Россия

³Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО»
г. Лыткарино, Россия

Аннотация: Развитие современного газотурбостроения предъявляет все более высокие требования к свойствам применяемых сплавов, связанных с повышением температуры газа перед турбиной. Однако применяемые никелевые сплавы имеют низкую жаростойкость при высоких температурах. Решения этой проблемы добиваются путем совместного применения жаропрочного сплава, воспринимающего нагрузки при высоких температурах, и нанесением защитных покрытий для обеспечения жаростойкости. Покрытие и жаропрочный сплав образуют сложную систему. Каждый компонент системы выполняет основную и второстепенную функции в работе, а система должна удовлетворять эксплуатационным требованиям. Выбор применяемого покрытия и технологии нанесения достаточно сложен, так как его структура и толщина зависят от многих факторов, в частности от состава исходных компонентов, температурно-временных параметров нанесения и т. д. Это оказывает влияние на работоспособность сформированного покрытия в условиях эксплуатации. В последние годы за рубежом и в нашей стране успешно развиваются шликерные методы нанесения покрытий и, в частности, формируемые из водных суспензий. Такой метод технически прост и экономичен. Качество формируемого из водной суспензии покрытия определяется процентным содержанием состава суспензии, ее реологическими и физическими свойствами, соблюдением технологии ее нанесения и обработки на детали. С целью понимания механизма формирования покрытия из водной суспензии необходимо представлять воздействие параметров суспензии на свойства покрытия. В статье представлены результаты проведенного исследования расчетным методом влияния параметров водной суспензии на качество получаемого покрытия. Показана зависимость толщины покрытия от размеров частиц порошков, вводимых в суспензию. Представлены расчеты плотности и толщины получаемого покрытия от соотношения твердой и жидкой фаз водной суспензии. Указывается, что в реальной суспензии влияние параметров водной суспензии на показатели формируемого покрытия являются более сложными, чем при проведении расчетов. Это в первую очередь связано с тем, что в реальной суспензии присутствуют частички порошков различного диаметра, в частности алюминия. Кроме того, взаимодействие ортофосфорной кислоты с вводимыми оксидами алюминия, кремния и другими, имеющими молекулярную дисперсность, их химическое взаимодействие усложняют учет всех этих факторов при расчетах. Однако полученные результаты исследования позволяют сделать оценку влияния параметров состава водной суспензии на технологические и служебные свойства покрытия, получаемого из такой суспензии шликерным методом.

Ключевые слова: водная суспензия, параметры суспензии, толщина покрытия, твердая и жидкая фазы суспензии.

Для цитирования: Самойленко В.М. Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом / В.М. Самойленко, Г.Т. Пашенко, Е.В. Самойленко, В.В. Шестаков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 53–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

The effect of suspension parameters on the properties of the coating obtained by the slip method

V.M. Samoylenko¹, G.T. Paschenko², E.V. Samoylenko¹,
V.V. Shestakov³

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

²*A. Lyulka Experimental Design Bureau – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Moscow, Russia*

³*Lytkarinsky Machine-Building Plant – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Lytkarino, Moscow, Russia*

Abstract: The development of modern gas turbine engineering imposes increasingly high requirements for the properties of the alloys used, associated with an increase in gas temperature before the turbine. However, the applicable nickel alloys have low heat resistance at high temperatures. The solution to this problem is achieved through the joint use of a heat-resistant alloy that takes loads at high temperatures, and the application of protective coatings to ensure heat resistance. The coating and the heat-resistant alloy form a complex system. Each component of the system performs the primary and secondary functions in the operation, and the system must meet operational requirements. The choice of the applied coating and its application technology are quite complicated, since its structure and thickness depend on many factors, in particular, on the composition of the original components, temperature, and time parameters of its application, etc. This affects the performance of the formed coating under operating conditions. In recent years, slip coating methods specifically formed from aqueous suspensions have been successfully developed abroad and in our country. This method is technically simple and economical. The quality of the coating formed from the aqueous suspension is determined by the percentage of the suspension composition, its rheological and physical properties, compliance with the technology of its application and processing of parts. In order to understand the mechanism of coating formation from the aqueous suspension, it is necessary to imagine the effect of the suspension parameters on the coating properties. The article presents the results of the study carried out by the computational method of the influence of the aqueous suspension parameters on the quality of the coating obtained. The dependence of the coating thickness on the particle sizes of the powders introduced into the suspension is shown. Calculations of the density and thickness of the obtainable coating from the ratio of the solid and liquid phases of the aqueous suspension are presented. It is indicated that in a real suspension, the influence of the aqueous suspension parameters on the coating parameters being formed is more complex than when performing calculations. This is primarily associated with the fact that in a real suspension there are powder particles of various diameters, in particular aluminum. In addition, the interaction of orthophosphoric acid with the introduced oxides of aluminum, silicon, etc., having molecular dispersion, their chemical interaction complicates considering all these factors in calculations. However, the obtained results of the study allow us to assess the influence of the aqueous suspension composition parameters on the technological and service properties of the obtainable coating obtained by the slip method from this suspension.

Key words: aqueous suspension, suspension parameters, coating thickness, solid and liquid phases of suspension.

For citation: Samoylenko, V.M., Paschenko, G.T., Samoylenko, E.V. & Shestakov, V.V. (2022). The effect of suspension parameters on the properties of the coating obtained by the slip method. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 53–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

Введение

С целью повышения жаростойкости, а значит, и долговечности лопаток турбины газотурбинного двигателя (ГТД), при их производстве и ремонте используется большой арсенал алюминидных покрытий: диффузионные (порошковые, шликерные, газоциркуляционные, алитирование в расплавах), конденсационные (электронно-лучевое, плазменное, лазерное, магнетронное и катодное

распыление), а также комбинированные и комплексные покрытия [1, 2].

Для получения этой широкой гаммы покрытий используют специальные дорогостоящие установки, поэтому при ремонте лопаток турбины ГТД жаростойкие алюминидные покрытия наносят более простым – шликерным методом (метод красок), основы которого были разработаны В.И. Просвириным [3, 4] еще в 1970-х годах.

В последние годы развиваются технологии получения защитного покрытия из вод-

ных суспензий. Так, американская фирма Sermatech Inc разработала ряд жаростойких покрытий Sermalloy J, Sermalloy W и других, наносимых из водной суспензии методом покраски, которые рекомендуется применять для защиты горячего тракта ГТД (в том числе и для внутренней поверхности лопаток турбины) морских судов. Покрытие Sermalloy J широко применяется английской фирмой «Ролс-Ройс» для защиты лопаток, изготовленных из сплава Jn 738 LC.

В Российской Федерации данное направление успешно развивал профессор Е.Г. Иванов. Им разработан ряд покрытий [5, 6], наносимых шликерным методом, включая и новые покрытия, формируемые из водных суспензий [7, 8].

Поэтому необходимо понимать механизм формирования получаемого нового покрытия из водных суспензий и определить влияние параметров суспензии на его качество.

Результаты расчета и их обсуждение

Новая суспензия для нанесения покрытия состоит из фосфатно-хроматной связки на водной основе и активной составляющей порошков алюминия и кремния. Активная часть суспензии – система алюминий-кремний после удаления воды при повышенной температуре образует легкоплавкий расплав с эвтектической составляющей [9].

Формирование покрытия из водной суспензии протекает с экзотермическими реакциями [10], что требует определения соотношения жидкой и твердой фазы, а также ее влияния на плотность $\rho_{\text{п}}$ и толщину $h_{\text{п}}$ получаемого покрытия.

Для проведения расчета сделаем следующие допущения.

Строение исходной суспензии будем принимать как твердую фазу, состоящую из шариков (частиц порошка) одинакового размера ($A = \text{const}$), и жидкую фазу одинаковой толщины h , осевшую на твердых шариках (рис. 1). При испарении воды толщина жидкой фазы уменьшается от h до X . При этом структура покрытия становится подобной структуре суспензии. Толщина оксидной пленки на каждом шарике (частичке порошка) остается постоянной (X).

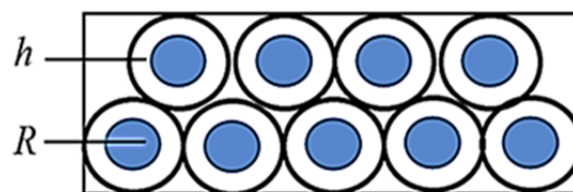


Рис. 1. Микроструктура оксидно-металлического покрытия: h – толщина пленки, R – радиус частицы

Fig. 1. Microstructure of the oxide-metal coating: h is the thickness of the film, R is the radius of the particle

1. Плотность твердой частицы порошка по ее сечению постоянна.

2. Изменениями объема оксидной пленки, вызванными химическими взаимодействиями, пренебрежем.

Объем и массу одной твердой частицы можно рассчитать:

$$V' = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (1)$$

и
$$m' = V' \rho = \frac{\pi d^3}{6} \rho. \quad (2)$$

Объем жидкой среды (V''), который будет приходиться на одну частицу твердой фазы, можно определить:

$$V'' = \frac{4}{3}\pi[(R + h)^3] = \frac{\pi}{3}(3d^2h + 6h^2d + 4d^3), \quad (3)$$

а весь объем жидкой фазы V определим:

$$V = V''N_{\text{частиц}} = V' \frac{m_{\text{т}}}{m'} = \frac{2m_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} \left(\frac{3d^2h + 6h^2d + 4d^3}{d^3} \right), \quad (4)$$

где m_T и ρ_T – масса и плотность твердой фазы,
 m'_T – масса одной частицы твердой фазы.

Весь объем жидкой фазы в данной суспензии состоит из объема воды V_b и объема оксидов V_o :

$$V = V_b + V_o. \quad (5)$$

То есть, подставив значения объемов, получим

$$\frac{m_{ж}}{\rho} = \frac{m_{ж}K_{H2O}}{\rho_{H2O}} + \frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o}, \quad (6)$$

где K_{H2O} – массовая доля воды в суспензии,
 ρ_o – плотность оставшихся оксидов.

Определим плотность оставшихся оксидов:

$$\rho_o = \frac{100 - K_{H2O}}{\frac{100}{\rho} - K_{H2O}}. \quad (7)$$

Подставим значение $V_o = \frac{4}{5}\pi[(R + X)^3 - R^3]$ в уравнение (1) и определим X (рис. 2):

$$V_b = \frac{4}{3}\pi \left[\left(d + h - \sqrt[3]{\frac{(100 - K_{H2O})m_{ж}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} \right)^3 - \frac{d^3}{8} \right]. \quad (10)$$

Чтобы найти весь объем воды, испарившейся из суспензии, необходимо испарившийся объем воды с одной частицы умножить на количество частиц, находящихся в суспензии. Тогда получим

$$V_b^* = \frac{8m_{ж}}{d^3\rho_{ТВ}} \left[d + h - \sqrt[3]{\frac{(100 - K_{H2O})m_{ж}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} \right]^3 - \frac{d^3}{8}. \quad (11)$$

После удаления воды образуется покрытие, состоящее из твердых частиц и конденсированных на них оксидов, что обеспечивает прочное покрытие (цементированное), которое можно транспортировать (рис. 3).

Тогда плотность покрытия можно определить:

$$\rho_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{m_{ТВ} + V_o^*\rho_o}{V_{ТВ} + V_o^*} = \rho_{ТВ} \cdot \frac{m_{ТВ} + V_o^*\rho_o}{m_{ТВ} + V_o^*\rho_{ТВ}}, \quad (12),$$

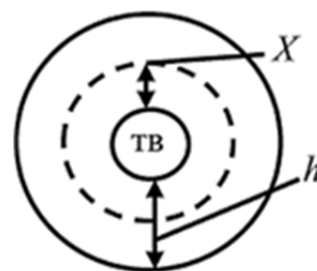


Рис. 2. Уменьшение толщины пленки от h (исходная толщина) до X (толщина оксидов) в процессе удаления воды

Fig. 2. Reduction of film thickness from h (initial thickness) to X (thickness of oxides) during water removal

$$\frac{4}{3}\pi[(R + X)^3 - R^3] = \frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o}m, \quad (8)$$

$$X = \sqrt[3]{\frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} - \frac{d}{2}. \quad (9)$$

Объем воды, испарившейся с одной частицы, получится

где V_o^* – объем конденсированных оксидов, а ρ_o – их плотность.

Толщину покрытия можно получить из пропорции

$$\frac{V_{\text{сусп}}}{h_{\text{сусп}}} = \frac{V_{\Pi}}{h_{\Pi}} \rightarrow h_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}h_{\text{сусп}}}{V_{\text{сусп}}}. \quad (13)$$

После подстановки и преобразования получаем

$$h_{\Pi} = \frac{m_{\text{ТВ}} + V_0^* \rho_0}{\frac{\rho_{\Pi}(d+2h)}{V_{\text{суп}}}}. \quad (14)$$

Результаты расчета влияния соотношения твердой и жидкой фаз суспензии и диаметра частицы твердой фазы на толщину и плотность покрытия, а также объем выделившейся воды сведен в табл. 1.

С точки зрения получения качественного покрытия одним из значимых параметров является его получаемая толщина. Известно [11, 12], что от толщины покрытия зависит его работоспособность, так как она определяет количество содержащегося в покрытии алюминия. Однако значительное увеличение толщины покрытия и содержания алюминия в покрытии приводит к снижению пластичности такого покрытия и увеличению разнотолщинности, что приводит к сколам и растрескиванию такого покрытия, а значит, снижению его работоспособности [13–15].



Рис. 3. Внешний вид покрытия лопаток после сушки при температуре 50...70 °С – 15 минут
Fig. 3. Appearance of the blade coating after drying at a temperature of 50...70 °C – 15 minutes

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета влияния соотношения фаз суспензии и диаметра частицы твердой фазы на плотность и толщину получаемого покрытия
The results of calculating the effect of the ratio of the suspension phases and the diameter of the solid phase particle on the density and thickness of the obtainable coating

$m_{\text{ТВ}}/m_{\text{ж}}$	d , мкм	$V_{\text{в}}^*$, %	V_0^* , %	$V_{\text{суп}}$, %	ρ_{Π} , г/см ³	h_{Π} , мкм
80/20	1	1,4	35,0	98,6	2,165	1,15
	5	1,8	34,6	98,2	2,169	5,75
	10	1,5	34,9	98,5	2,166	11,5
	15	1,9	34,8	98,1	2,169	17,9
60/40	1	11,2	50,9	88,8	1,811	1,24
	5	11,8	50,8	88,2	1,815	6,11
	10	11,3	50,7	88,7	1,812	12,52
	15	11,9	50,1	88,1	1,819	20,7
40/60	1	18,3	61,1	81,7	1,496	1,64
	5	19,0	60,5	81,0	1,499	6,91
	10	18,7	60,7	81,3	1,498	13,8
	15	19,1	60,3	80,9	1,197	20,7
20/80	1	27,5	63,7	72,5	1,312	1,64
	5	28,0	63,2	72,0	1,313	8,17
	10	27,8	63,3	72,2	1,312	16,35
	15	28,1	63,2	72,9	1,313	24,5
1/99	1	25,2	74,3	74,8	1,218	4,8
	5	25,3	74,3	74,7	1,218	24,0
	10	25,0	74,6	75,0	1,218	48,1
	15	25,0	74,6	75,0	1,218	72,1

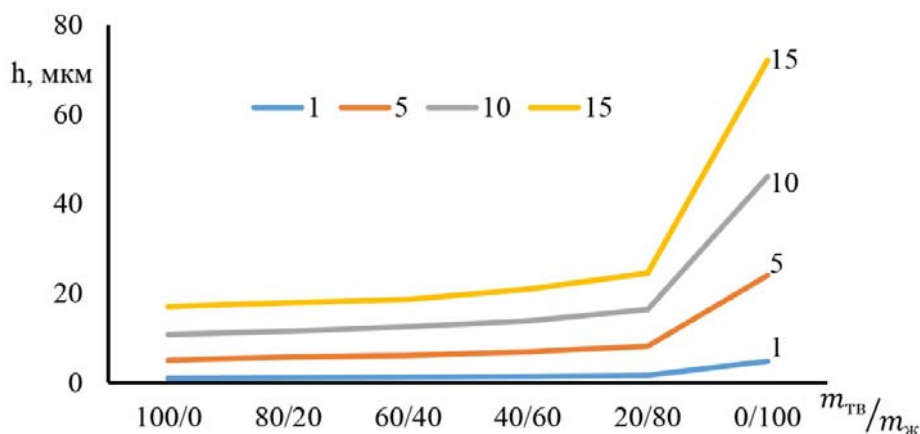


Рис. 4. Влияние диаметра частиц алюминия и отношения твердой и жидкой фаз на толщину формируемого покрытия
Fig. 4. Influence of the aluminum particles diameter and the ratio of solid and liquid phases on the thickness of the coating under formation

Как видно из полученных расчетов (табл. 1 и рис. 4) толщина покрытия возрастает с увеличением диаметра частиц алюминиевого порошка в суспензии. Для уменьшения толщины покрытия, а также разнотолщинности покрытия на конкретной детали, следует в суспензии использовать высокодисперсные порошки.

Некоторое увеличение толщины покрытия с ростом жидкой фазы можно объяснить более рыхлой структурой оксидной фазы в сравнении с металлической фазой.

Плотность покрытия (табл. 1) не зависит от диаметра частицы алюминиевого порошка, но монотонно возрастает с увеличением его концентрации в водной суспензии.

Количество выделяемой воды (табл. 1) практически не зависит от размеров порошка металлической составляющей суспензии и определяется в основном содержанием жидкой фазы суспензии. Для получения более качественного (без пор) покрытия, формируемого из водной суспензии, содержащей повышенное количество жидкой фазы, процесс ее удаления следует вести более осторожно, чем при формировании покрытия с меньшим содержанием жидкой фазы. Большое содержание жидкой фазы требует медленного увеличения температуры сушки, так как при быстром нагреве происходит резкое испарение воды, приводящее к образованию пор

и растрескиванию образующегося в процессе сушки твердого слоя покрытия (рис. 5).

Реальная новая водная суспензия содержит кроме частичек порошка алюминия и кремния частицы хромового ангидрида, который под воздействием кислоты растворяется. Частицы вводимых порошков имеют различные размеры и не всегда являются шарообразными. Кроме того, при приготовлении водной суспензии протекает ряд химических реакций с образованием оксидов, имеющих молекулярную дисперсность, а также другие процессы, влияющие на механизм формиро-

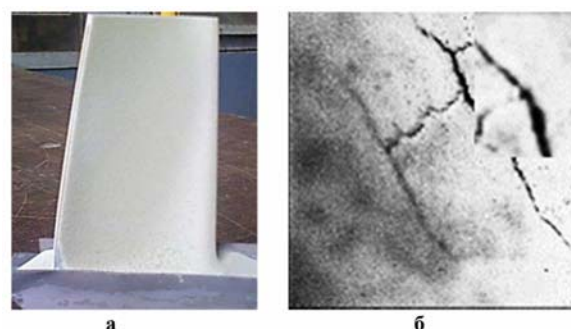


Рис. 5. Внешний вид лопатки турбины ГТД после нанесения и сушки водной суспензии (а) и участок растрескивания твердого слоя покрытия при быстрой сушке (б)

Fig. 5. Appearance of the GTE turbine blade after applying and drying the aqueous suspension (a) and the cracking area of the solid coating layer during rapid drying (b)

вания покрытия [16–18]. Это усложняет проведение расчета с учетом указанных факторов, поэтому был введен ряд допущений. Однако полученные расчеты показывают влияние основных параметров новой водной суспензии на параметры формируемого покрытия, что дает возможность управлять процессом образования защитного покрытия начиная со стадии подготовки исходной новой суспензии.

Выводы

1. На основании проведенных расчетов установлена зависимость толщины формируемого защитного покрытия от соотношения твердой и жидкой фаз в исходной новой суспензии.

2. Количество жидкой фазы не влияет на толщину покрытия, но оказывает влияние на технологический параметр сушки покрытия, а именно скорость удаления воды из твердого осадка покрытия, нанесенного на деталь.

3. Параметры реальной водной суспензии оказывают более сложное влияние на качество формируемого покрытия, которые необходимо учитывать в процессе его нанесения.

Список литературы

1. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С.** Химико-термическая обработка жаростойких сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 622 с.

2. **Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A.** Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs // Russian metallurgy (Metally). 2012. No. 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1134/S0036029512010089

3. Скоростные процессы химико-термической обработки с применением паст и суспензий: сборник статей / Под ред. проф. В.И. Просвирина. Рига: РКИИГА, 1972. 110 с.

4. **Просвирин В.И.** Диффузионная металлизация с использованием паст и суспензий // МиТОМ. 1972. № 12. С. 40–48.

5. **Иванов Е.Г.** Получение многокомпонентных покрытий при восстановлении

элементов из оксидов // Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского. 1976. С. 46–51.

6. **Иванов Е.Г.** Суспензия для алюмосилицирования металлических деталей. Патент RU № 2032764 С1, 10.04.1995.

7. **Иванов Е.Г.** Новое жаростойкое покрытие / Е.Г. Иванов, А.В. Зоричев, В.М. Самойленко, Г.Т. Пащенко // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 22–24.

8. **Иванов Е.Г.** Применение покрытий из водной суспензии для защиты деталей ГТД от коррозии / Е.Г. Иванов, В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, М.А. Петрова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217. С. 46–50.

9. **Шанк Ф.А.** Структура двойных сплавов: справочник / Пер. с англ. А.М. Захарова, В.С. Золоторевского, П.К. Новика, Ф.С. Новика, под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. М.: Металлургия, 1973. 760 с.

10. **Лякишев Н.П.** Алюминотермия / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко, С.И. Лаппо. М.: Металлургия, 1978. 424 с.

11. **Ачимов А.А., Толмачев И.М., Удовиченко С.Ю.** Исследование жаростойкого диффузионного покрытия на лопатках газотурбинных двигателей из жаропрочного никелевого сплава // Вестник тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2014. № 7. С. 105–111.

12. **Tzatzov K.K.** Protective system for high temperature metal alloy products / K.K. Tzatzov, A.S. Gorodetsky, A. Wysieki-erski, G.A. Fisher. Patent US, no. 6682780 B2, 27.01.2004.

13. **Коломыцев П.Т.** Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1991. 239 с.

14. **Agüero A.** Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components / A. Agüero, R. Muelas, A. Pastor, S. Osgerby // Surface & Coatings Technology. 2005. Vol. 200, iss. 5-6. Pp. 1219–1224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.080

15. **Зайцев Н.А.** Прогнозирование ресурса комплекса «жаропрочный сплав – жаростойкое покрытие» на основе оценки струк-

турной стабильности / Н.А. Зайцев, А.В. Логунов, В.М. Самойленко, А.А. Шатульский // Вестник Московского государственного открытого университета. Москва. Серия: техника и технология. 2012. № 2. С. 5–17.

16. Agüero A. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components / A. Agüero, R. Muelas, M. Gutierrez, R. Van Vulpen, S. Osgerby, J.P. Banks // *Surface & Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, iss. 14. Pp. 6253–6260. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.033

17. Мушкамбаров Н.Н. Физическая и коллоидная химия. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2001. 384 с.

18. Иванов Е.Г., Пащенко Г.Т., Самойленко В.М. Жаростойкое покрытие для деталей турбины ГТД, получаемое из водной суспензии // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 4. С. 51–53.

References

1. Abraimov, N.V. & Eliseev, Yu.S. (2001). [*Thermochemical treatment of heat-resisting steels and alloys*]. Moscow: Internet Inzhiniring, 622 p. (in Russian)

2. Kablov, E.N. & Muboyajyan, S.A. (2012). *Heat-resistant coatings for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines*. Russian metallurgy (Metally), no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1134/S0036029512010089

3. Prosvirin, V.I. (Ed.). (1972). [*High-speed processes of thermochemical treatment using pastes and suspensions: collection of articles*]. Riga: RKIIGA, 110 p. (in Russian)

4. Prosvirin, V.I. (1972). [*Diffusion metalization using pastes and suspensions*]. MiTOM, no. 12, pp. 40–48. (in Russian)

5. Ivanov, E.G. (1976). [*Obtaining multi-component coatings during the reduction of elements from oxides*]. Trudy VVIA im. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 46–51. (in Russian)

6. Ivanov, E.G. (1995). [*Suspension for aluminosilicizing metal parts*]. Patent RU, no. 2032764 C1, April 10. (in Russian)

7. Ivanov, E.G., Zorichev, A.V., Samoylenko, V.M. & Pashchenko, G.T. (2008). [*New*

heat-resistant coating]. Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress, no. 3, pp. 22–24. (in Russian)

8. Ivanov, E.G., Samoylenko, V.M., Ravi-
ilov, R.G. & Petrova, M.A. (2015). *Application of the aqueous coating suspension for the protection of gas turbine engine parts from corrosion*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 217, pp. 46–50. (in Russian)

9. Shank, F.A. (1973). [*The structure of double alloys: Handbook*]. Translation from English by Zakharov A.M., Zolotorevskiy V.S., Novik P.K., Novik F.S., in Novikov I.I., Rogelberg I.L. (Ed.). Moscow: Metallurgiya, 760 p. (in Russian)

10. Lyakishev, N.P., Pliner, Yu.L., Ignatenko, G.F. & Lappo, S.I. (1978). [*Aluminothermy*]. Moscow: Metallurgiya, 424 p. (in Russian)

11. Achimov, A.A., Tolmachev, I.M. & Udovichenko, S.Yu. (2014). *The study of heat-proof diffusion coating on heat-resistant nickel alloy GTE blades*. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no. 7, pp. 105–111. (in Russian)

12. Tzatzov, K.K., Gorodetsky, A.S., Wysiekierski, A. & Fisher, G.A. (2004). *Protective system for high temperature metal alloy products*. Patent US, no. 6682780 B2, January 27.

13. Kolomytsev, P.T. (1991). [*High-temperature protective coatings for nickel alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 239 p. (in Russian)

14. Agüero, A., Muelas, R., Pastor, A. & Osgerby, S. (2005). *Steam oxidation test under prolonged exposure and mechanical properties of suspension aluminide coatings for steam turbine components*. Technology of surfaces and coatings, vol. 200, issue 5-6, pp. 1219–1224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.080

15. Zaitsev, N.A., Logunov, A.V., Samoylenko, V.M. & Shatul'skiy, A.A. (2012). [*Forecasting the resource of the complex "heat-resistant alloy – heat-resistant coating" based on the assessment of structural stability*]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. Moskva. Seriya: tekhnika i tekhnologiya, no. 2. pp. 5–17. (in Russian)

16. Agüero, A., Muelas, R., Gutierrez, M., Van Vulpen, R., Osgerby, S. & Banks, J.P. (2007). *Cyclic oxidation and mechanical behavior of slurry aluminide coatings for steam turbine components*. Surface & Coatings Technology, vol. 201, issue 14, pp. 6253–6260. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.033

17. Mushkambarov, N.N. (2001). [*Physical and colloidal chemistry*]. Moscow: GEOTAR-MED, 384 p. (in Russian)

18. Ivanov, E.G., Pashchenko, G.T. & Samoylenko, V.M. (2007). *Aqueous slurry-based heat-resistant coating for turbine components of gas-turbine engines*. All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight"), no. 4, pp. 51–53. (in Russian)

Сведения об авторах

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Пашенко Геннадий Трофимович, кандидат технических наук, начальник управления САУ опытно-конструкторского бюро имени А. Люльки – филиала ПАО «ОДК-УМПО», gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Самойленко Елизавета Васильевна, студентка механического факультета МГТУ ГА, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Шестаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, ведущий инженер, Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО», Vladesha@yandex.ru.

Information about the authors

Vasily M. Samoylenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Gennady T. Paschenko, Candidate of Technical Sciences, The Head of the ACS Department of the A. Lyulka Experimental Design Bureau, Branch of PJSC "UEC-UMPO", gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Elizaveta V. Samoylenko, Student of the Mechanical Faculty, Moscow State Technical University of Civil Aviation, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Vladimir V. Shestakov, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer – Lytkarinsky Machine-Building Plant, Branch of PJSC "UEC-UMPO", Vladesha@yandex.ru.

Поступила в редакцию 05.07.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 05.07.2022
Accepted for publication 24.11.2022

УДК 629.735.33:004.021

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем

В.Д. Шаров¹, В.Л. Кузнецов¹, П.М. Поляков¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Эксплуатанты беспилотных авиационных систем (БАС), выполняющие авиационные работы, в соответствии с сертификационными требованиями федеральных авиационных правил обязаны иметь систему управления безопасностью полетов, центральным компонентом которой является управление рисками. Непосредственное использование методов оценки рисков и разработки корректирующих мероприятий, применяемых в пилотируемой авиации, затруднительно ввиду эксплуатационных особенностей БАС. В статье представлена методика управления рисками для безопасности полетов БАС категории В (специальной категории), основанная на разработках группы JARUS, созданной при EASA для решения проблем беспилотной авиации. Предлагаемая методика объединяет положения метода SORA, разработанные JARUS и разбросанные в семи документах, в единую логически связанную систему с учетом особенностей воздушного законодательства РФ и принятой в ГА РФ терминологии. Важная задача оценки предполагаемой эффективности мероприятий по управлению рисками в методических разработках JARUS не имеет законченного решения. В статье предлагается восполнить этот пробел с применением обработки экспертных оценок методом анализа иерархий теории нечетких множеств. Это позволяет обоснованно построить иерархию мероприятий по степени их влияния на снижение рисков и разделить их на три группы. Такое деление необходимо для оценки применимости мероприятий в зависимости от величины суммарного риска. Хотя эксплуатация БАС категории В предполагается в сегрегированном воздушном пространстве, методика учитывает не только риски столкновения с объектами на земле, но и риски столкновения с пилотируемыми ВС, поскольку на практике создать «идеальное» сегрегированное пространство обычно не удастся. Предлагаемая методика может использоваться в перспективе при разработке методов управления риском эксплуатации БАС категории С в открытом воздушном пространстве.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, риск для безопасности полетов, экспертное оценивание, метод анализа иерархий.

Для цитирования: Шаров В.Д., Кузнецов В.Л., Поляков П.М. К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 62–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

To the risk management methodology of unmanned aircraft systems operators

V.D. Sharov¹, V.L. Kuznetsov¹, P.M. Polyakov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Operators of unmanned aircraft systems (UAS), performing aeronautical work in accordance with the certification requirements of the Federal Aviation Regulations, are obliged to have a Flight Safety Management System (FSMS), the critical element of which is risk management. The utilization of the risk assessment methods and the development of corrective actions, used in manned aviation, is problematic due to the UAS operational characteristics. The article presents the FSMS methodology for UAS of category B (special category) based on the developments of JARUS group, established with EASA, to address the unmanned aviation operation issues. The proposed methodology integrates the SORA method provisions, developed by JARUS, and comprised into seven documents, into the unified logically related system with consideration to the specific traits of the Russian Federation Aviation legislation and the terminology adopted in the Russian Federation civil aviation. The key problem of assessing the expected effectiveness of risk management actions in the JARUS methodological guidelines does not have a complete solution.

The article proposes to solve the problem using professional evaluation by means of the hierarchy analysis method of the fuzzy set theory. This allows us to reasonably build the hierarchy of actions according to their impact on risk mitigation and to classify them into three categories. Such a classification is imperative to evaluate the applicability of actions depending on the amount of total risk. Although the UAS operation of category B is supposed to be performed in the segregated airspace, the methodology takes into consideration not only the risks of collision with objects on the ground but also mid-air collision risks with manned aircraft, since it is usually impractical to create the “ideal” segregated airspace. The proposed methodology can be utilized in the long view when developing risk management practices of UAS operation of category C in open skies.

Key words: unmanned aircraft systems, flight safety risk, professional evaluation, hierarchy analysis method.

For citation: Sharov, V.D., Kuznetsov, V.L. & Polyakov, P.M. (2022). To the risk management methodology of unmanned aircraft systems operators. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 62–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

Введение

В данной статье используется принятая в РФ терминология¹: беспилотная авиационная система (БАС) состоит из беспилотного воздушного судна (БВС) и наземного оборудования для управления БВС.

Беспилотная авиация является самым быстрорастущим сегментом отрасли, а эксплуатация БАС обходится в 10 раз дешевле, чем вертолета или самолета [1]. Современные БВС выполняют полеты на значительные расстояния при невозможности их визуального наблюдения. Примерами могут быть полеты для контроля загрязнения окружающей среды выбросами от морских судов [2] или использование БВС для доставки больному критически важных медикаментов в условиях городской среды [3].

Обеспечение безопасности полетов (БП) при эксплуатации БАС является, безусловно, важнейшей задачей. БВС представляют опасность как для людей и объектов на земле, так и для пилотируемых воздушных судов (ПВС). При этом, как отмечено в [4] на основе анализа 152 событий, наибольшие риски при эксплуатации БАС связаны с потерей управления в полете и техническими отказами. По сравнению с ПВС события с БВС случаются чаще на этапах взлета и полета по

маршруту. По данным Росавиации, в 2021 г. отмечено увеличение случаев, когда экипажи ПВС наблюдали БВС в непосредственной близости от себя.

В государственном реестре воздушных судов РФ по состоянию на 01.01.2022 было зарегистрировано 34 БВС с максимальной взлетной массой более 30 кг, на учет было поставлено 42204 БВС с массой 30 кг и менее². Известно, что в РФ работают более 100 организаций и частных компаний, чья деятельность связана с разработкой, производством и эксплуатацией БАС гражданского назначения. Большинство этих организаций должны иметь систему управления безопасностью полетов (СУБП). Разработчики и производители – в соответствии с требованиями ФАП-21³, а эксплуатанты, если они выполняют авиационные работы, – в соответствии с ФАП-494⁴. Центральным компонен-

¹ Воздушный кодекс РФ от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ. Глава V. Воздушные суда. П. 5.6. [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/10200300/b3975f01ce8b0eb0c9b11526d9b4c7bf/#friends> (дата обращения: 27.01.2022).

² Анализ состояния безопасности полетов в ГА РФ в 2021 г. [Электронный ресурс] // ФАВТ. Росавиация. 2022. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-bezopasnost-poletov-amripp-obnovleniya/> (дата обращения: 27.01.2022).

³ Приказ Министерства транспорта РФ от 17 июня 2019 г. № 184 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/72701980/> (дата обращения: 27.01.2022).

⁴ Приказ Министерства транспорта РФ от 19 ноября 2020 г. № 494 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, выполняющим авиационные работы, включенные в перечень авиационных работ, предусматривающих получение до-

том СУБП является управление рисками для БП. Для эксплуатантов БАС разрабатываемые методы должны учитывать специфику этого сегмента авиации, непосредственное применение методов, работающих в пилотируемой авиации, затруднительно.

При разработке и внедрении наборов корректирующих и предупреждающих мероприятий всегда возникает задача оценки их сравнительной эффективности, т. е. их ранжирования или построения иерархии. Такая оценка должна выполняться в каждой организации с учетом особенностей эксплуатации и парка БАС, поэтому всегда будет велика роль экспертного оценивания.

Задача обработки результатов такого оценивания может решаться различными методами. Ввиду высокого уровня неопределенности факторов опасности естественным инструментом построения иерархий могут быть приложения теории нечетких множеств.

1. Основные положения методики оценки рисков для БАС

В РФ в соответствии с ГОСТ Р 59517-2021⁵ установлены 3 категории БАС: А, В, С. Наиболее актуальной является разработка метода оценки рисков для категории В, поскольку такие БАС используются уже достаточно широко для выполнения авиационных работ.

Критерии для отнесения БАС к категории В следующие:

кумента, подтверждающего соответствие требованиям федеральных авиационных правил юридического лица, индивидуального предпринимателя. Форма и порядок выдачи документа (сертификата эксплуатанта), подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил. Порядок приостановления действия, введения ограничений в действие и аннулирования сертификата эксплуатанта» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/400164758/> (дата обращения: 27.01.2022).

⁵ ГОСТ Р 59517-2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. М.: Стандартинформ, 2021. 5 с.

1. Характеристики и конструкция БАС превышает ограничения категории А, т. е.:

- а) масса БВС может быть более 30 кг;
- б) максимальная кинетическая энергия БВС в полете более 100 Дж;
- в) БВС имеет вращающиеся части, способные нанести телесные повреждения;
- г) допускается выполнение авиационных работ;
- д) высота полета не ограничена;
- е) полеты могут выполняться в условиях VLOS, EVLOS и BVLOS⁶;
- ж) полеты могут выполняться вблизи людей и строений.

2. Система автоматического управления в случае потери связи обеспечивает возвращение в точку начала полета или завершение полета.

3. БАС предполагается использовать для выполнения работ в одобренном объеме воздушного пространства в соответствии с Правилами⁷.

4. БАС допускается к полетам при условии подтверждения соответствия требованиям к единичному экземпляру БВС в составе БАС или утвержденному федеральным органом исполнительной власти в области ГА объему требований к летной годности БАС с БВС соответствующего типа в форме сертификата типа.

5. Для доказательства соответствия БАС категории В ожидаемым условиям эксплуатации заявитель может использовать резуль-

⁶ VLOS – Visual Line of Sight – обеспечивается визуальное наблюдение командира воздушного судна (КВС) за БВС в полете.

EVLOS – Extended Visual Line of Sight – поддерживается непрерывная ситуационная осведомленность КВС о воздушном пространстве посредством визуального наблюдения с помощью других людей и/или технических средств.

BVLOS – Beyond Visual Line of Sight – управление БВС без прямого визуального контакта с БВС.

⁷ Постановление Правительства РФ от 22 сентября 1999 г. № 1084 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/180938/> (дата обращения: 27.01.2022).

таты оценки риска особых ситуаций, возникновение которых возможно во время полета БВС, в соответствии с методами, утвержденными федеральным органом исполнительной власти в области ГА.

Утвержденных методов оценки рисков для БАС категории В в ГА РФ пока нет. Критический анализ некоторых практик, применяемых в США и Великобритании [5], показал их ограниченность. Наиболее проработанным является подход организации *Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems* (JARUS), образованной EASA, его и предлагается взять за основу. Эта методика ориентирована на БАС «специальной категории» по международной классификации⁸, которая аналогична категории В по классификации, принятой в РФ.

Результаты JARUS опубликованы в документе «Руководящие принципы по оценке рисков специальной категории» (SORA) [6] и в шести приложениях к нему. Эта разработка применяется в ряде стран, например в Швейцарии и Дании [7], для подтверждения соответствия БАС условиям эксплуатации. Предлагаемая в настоящей статье методика впервые на русском языке объединяет положения семи указанных документов с учетом требований воздушного законодательства РФ. Принятое понимание риска как «сочетания вероятности события и тяжести последствий» соответствует «технократической концепции риска», выраженной в понятии «риск для БП» в Приложении 19 ИКАО.

В настоящее время БВС штатно эксплуатируются в сегрегированном пространстве, но исследования по оценкам риска полетов в несегрегированном пространстве ведутся. Например, в [8] на основе классического вероятностного подхода с учетом длины участков трасс и углов их пересечения предлагается метод расчета предельного числа БВС

на воздушной трассе. Выводы в статье осторожные, окончательного решения задачи нет. Расширению зоны полетов, как отмечено в глубоком анализе вопроса⁹, препятствует отсутствие апробированных технологий, правил, процедур и требований к минимальным характеристикам БАС, недостаток технических решений по линиям С2, по системам предотвращения столкновений, связи, навигации и наблюдения БАС. Тем не менее в РФ в соответствии с Концепцией интеграции БВС уже в 2027 г. планируется начать полеты в несегрегированном воздушном пространстве¹⁰.

В предлагаемой методике также рассматриваются риски, связанные со столкновением БВС с ПВС, поскольку создать «идеальное» сегрегированное пространство в большинстве случаев не удастся и возможно проникновение БВС в «примыкающее воздушное пространство» (рис. 1). Рассматриваются риски столкновения БВС с объектом на земле и с ПВС в воздухе. Риски столкновения между двумя БВС не рассматриваются.

2. Оценка рисков столкновения БАС с объектами на земле и в воздухе

Пошаговая схема процесса управления рисками приведена на рис. 2.

Шаг 1. Описание концепции эксплуатации. Оно должно быть максимально подроб-

⁸ Unmanned aircraft system (UAS) operations in the "open" and "specific" categories [Электронный ресурс] // EASA. 06.02.2018. URL: <https://www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-012018> (дата обращения: 27.01.2022).

⁹ Анализ международных и национальных программ, нормативных актов и современных технологических решений, относящихся к интеграции беспилотных авиационных систем в контролируемое и неконтролируемое воздушное пространство, и предложения по их совершенствованию в РФ. Аналитический центр «Аэронет» [Электронный ресурс] // Аэронет. Национальная технологическая инициатива. 01.04.2019. URL: <http://nti-aeronet.ru/blog/2019/04/01/analiz-mezhdunarodnyh-i-nacionalnyh-programm-otnosjashhihsja-k-integracii-bas/> (дата обращения: 27.01.2022).

¹⁰ Концепция интеграции БВС в воздушное пространство РФ. Утверждено Распоряжением Правительства РФ от 05.10.2021 № 28.06-р [Электронный ресурс] // Правительство России. 11.10.2021. 21 с. URL: <http://government.ru/docs/43502/> (дата обращения: 27.01.2022).

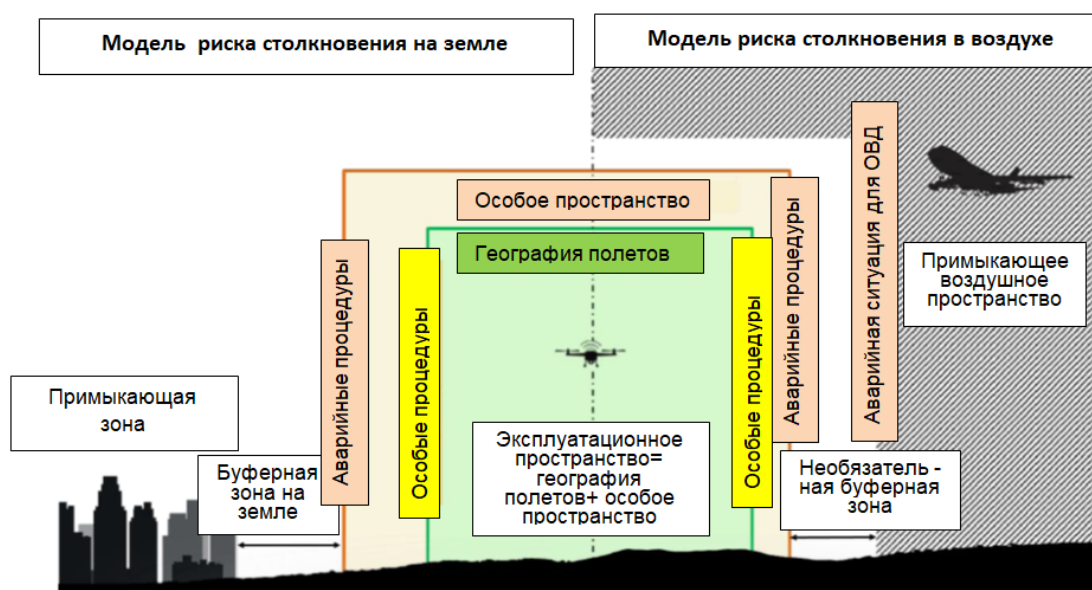


Рис. 1. Графическое представление семантической модели методики
Fig. 1. Diagram representation of the semantic model of methodology

Таблица 1
Table 1

Определение классов наземного риска (GRC)
Ground Risk Classification (GRC)

Класс внутреннего наземного риска БВС				
Максимальный характеристический размер БВС	1 м	3 м	8 м	> 8 м
Ожидаемая кинетическая энергия	< 700 Дж	< 34 КДж	< 1084 КДж	> 1084 КДж
Условия эксплуатации				
VLOS/BVLOS в контролируемой зоне	1	2	3	4
VLOS в малонаселенной среде	2	3	4	5
BVLOS в малонаселенной среде	3	4	5	6
VLOS в густонаселенной среде	4	5	6	8
BVLOS в густонаселенной среде	5	6	8	10
VLOS над скоплением людей	7			
BVLOS над скоплением людей	8			

ным и включать соответствующую техническую, операционную и системную информацию, необходимую для оценки риска.

Оценка риска столкновения с объектом на земле

Шаг 2. Определение класса наземного риска (*Ground Risk Classification – GRC*). Основные положения:

а) наземный риск БАС относится к риску поражения человека;

б) для определения GRC необходимо знать максимальный размер БВС (размах крыла, диаметр лопасти и т. д.) и сценарий эксплуатации;

в) заявитель определяет зону риска, включая весь оперативный объем, как показано на рис. 1. Конкретное значение GRC определяется по табл. 1.

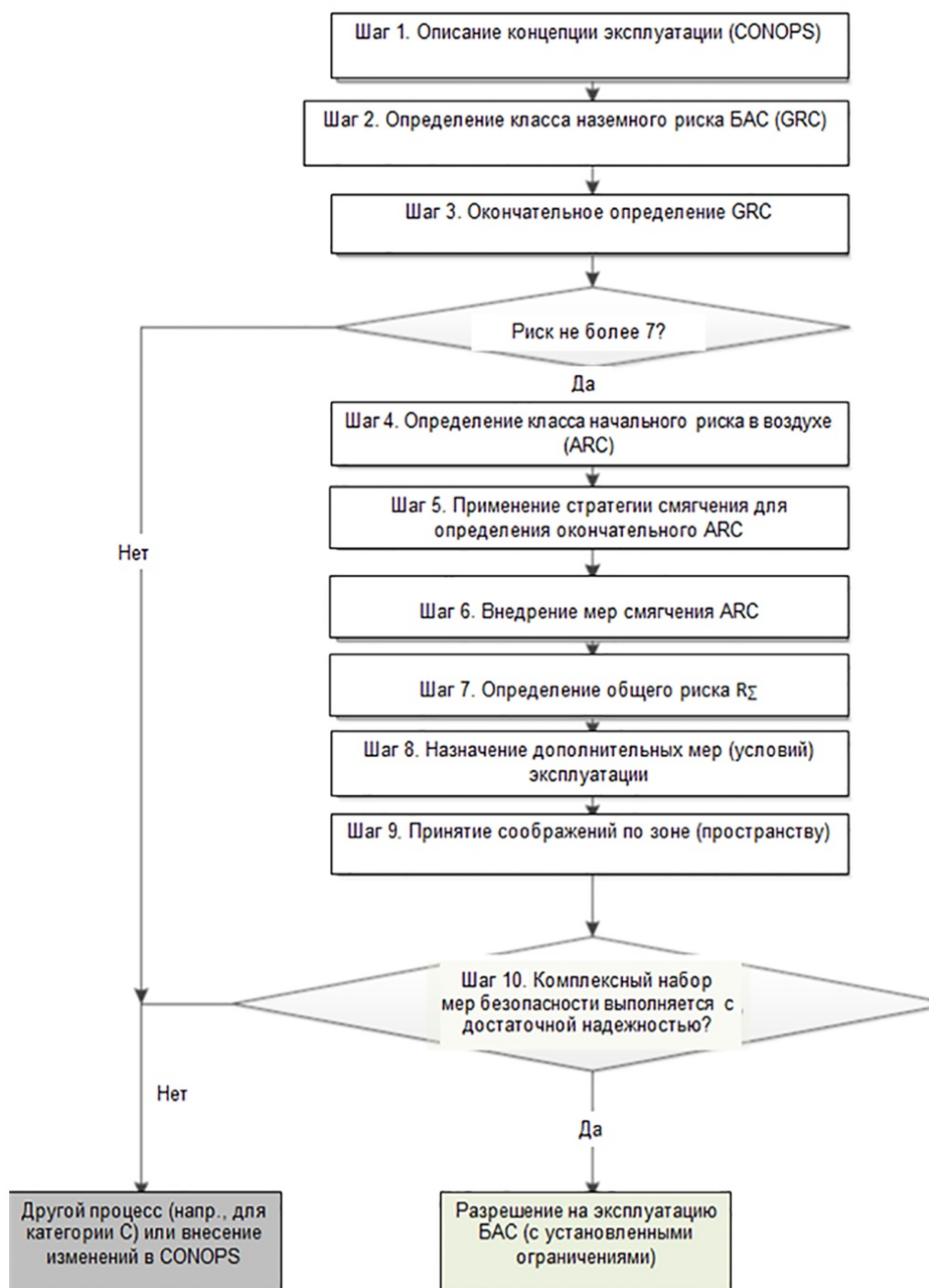


Рис. 2. Общая схема управления риском
Fig. 2. The general diagram of risk management

Если сочетания условий попадают в темную зону табл. 1, то такие операции не подерживаются данной методикой.

Шаг 3. Полученная по табл. 1 балльная оценка риска может быть снижена с помощью демпфирующих риск мероприятий. При этом

необходимо иметь оценку эффективности мероприятий, отнеся каждое из них к одной из групп эффективности: «низкая», «средняя» или «высокая». Поправка в GRC может достигать -4 , и, если итоговая оценка превышает 7, считается, что риски неприемлемы.

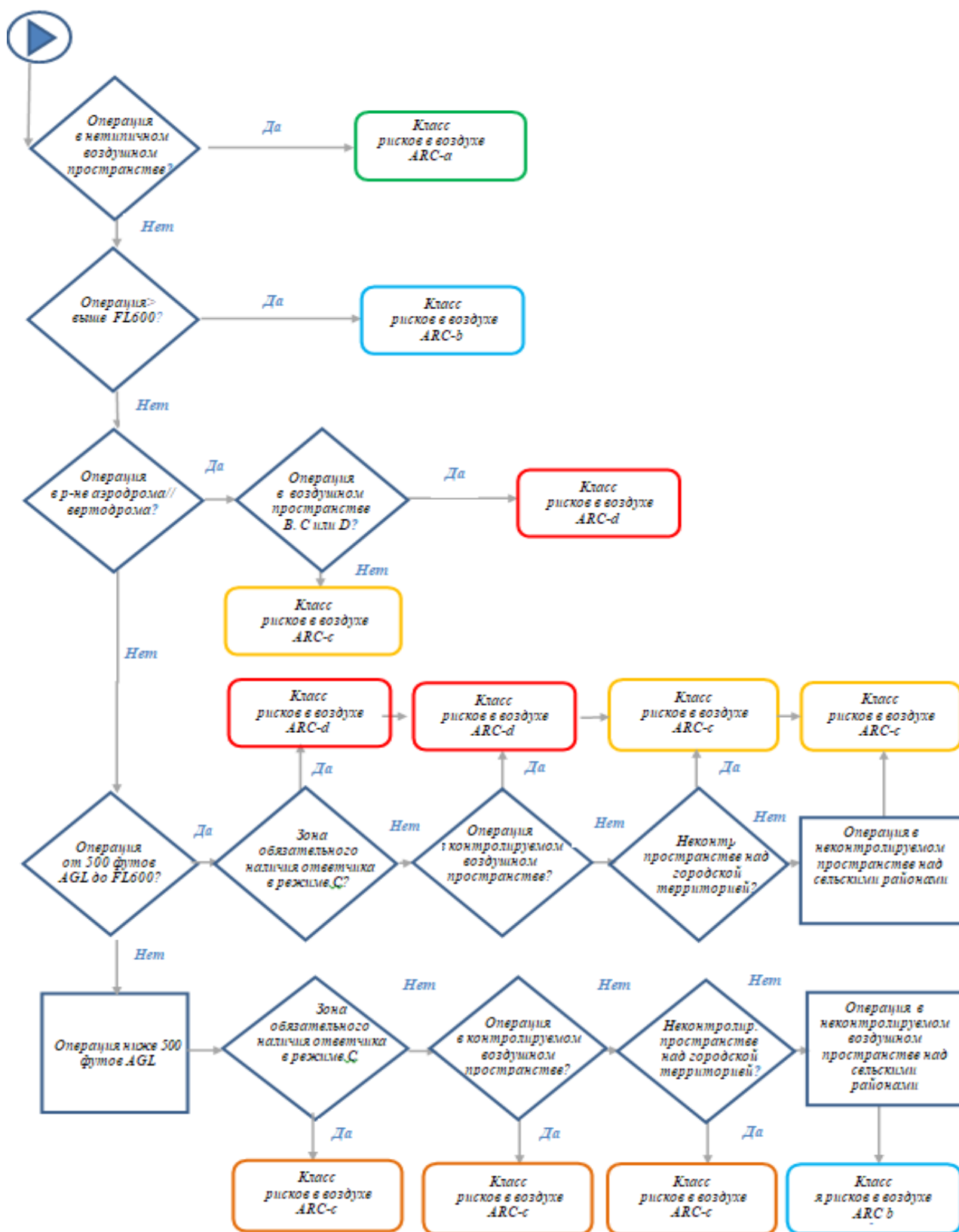


Рис. 3. Дерево решений для определения класса риска столкновения в воздухе ARC
Fig. 3. The decision tree for determining Air Collision Risk Class ARC

Таблицы 2
Table 2

Определение общего риска эксплуатации R_{Σ}
Determination of the general operation risk R_{Σ}

R_{Σ}				
	ARC			
GRC	a	b	c	d
≤ 2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
> 7	Условия эксплуатации соответствуют БАС категории С			

Оценка риска столкновения в воздухе

Шаг 4. Определение начального класса риска в воздухе (*Air Risk Classification – ARC*).

Начальный ARC подразделяется на 4 класса: a, b, c, d. Класс определяется по дереву решений (рис. 3). Отметим, что указанные на схеме классы воздушного пространства соответствуют классификации из Приложения 11 ИКАО¹¹ и классы В и D не применяются в РФ, однако это никак не влияет на оценку ARC по дереву решений.

Класс риска может быть снижен с помощью стратегических и тактических мер управления.

Шаг 5. Стратегические меры предполагают планирование полетов с учетом ограничений по зоне и времени так, чтобы минимизировать нахождение БВС в районе полетов пилотируемых ВС.

Шаг 6. Тактические меры принимают форму систем обнаружения и предотвращения, таких как ADS-B, FLARM, или оперативных процедур. В зависимости от остаточного риска требования к тактическим мерам могут варьироваться. Также оператор должен

сотрудничать с соответствующим органом ОВД и должен уделять внимание функциям, которые могут повысить заметность БВС в воздухе, в том числе радиолокационную.

Подробное описание шагов 5 и 6 выходит за рамки формата статьи.

Шаг 7. Определение общего риска эксплуатации БАС. После определения окончательного GRC и остаточного ARC имеем общий риск R_{Σ} (табл. 2).

Шаг 8. Определение мероприятий и условий снижения рисков.

На данном шаге необходимо предложить дополнительные мероприятия и возможность их использования в зависимости от эффективности мероприятия и значения R_{Σ} . Установлены 3 уровня эффективности: L – низкая, M – средняя, H – высокая. Например, как показано в табл. 3, мероприятие 1 может использоваться для снижения риска при R_{Σ} уровня I или II даже при малой эффективности (L), для R_{Σ} уровня III или IV – только если его эффективность не ниже средней (M), а для R_{Σ} уровня V или VI – только если его эффективность высокая (H).

Для других возможных мероприятий требования будут другими.

Таким образом, на шаге 8 (как и на шаге 3) организация должна иметь методику оценки эффективности мероприятий приме-

¹¹ Обслуживание воздушного движения. Приложение 11 к Конвенции о международной ГА. 14-е изд. // ИКАО, 2016. 144 с.

Таблица 3
Table 3

Пример формирования требований к эффективности мероприятий
Pattern of requirements formation for effectiveness of actions

№	Мероприятие (условие) снижения риска	R_{Σ}					
		I	II	III	IV	V	VI
		Требование к эффективности мероприятия					
1	Удаленный экипаж обучен определять критические условия окружающей среды и избегать их	L	L	M	M	M	H
2	Существуют процедуры для устранения износа внешних систем, поддерживающих работу БАС	L	M	H	H	H	H

Таблица 4
Table 4

Определение уровня эффективности мероприятий
Level determination of actions effectiveness

Влияние \ Надежность	Низкая надежность	Средняя надежность	Высокая надежность
	Низкая эффективность	Низкая эффективность	Низкая эффективность
Малое снижение риска	Низкая эффективность	Низкая эффективность	Низкая эффективность
Существенное снижение риска	Низкая эффективность	Средняя эффективность	Средняя эффективность
Значительное снижение риска	Низкая эффективность	Средняя эффективность	Высокая эффективность

нительно к своим условиям. JARUS предлагает устанавливать уровень эффективности мероприятия как сочетание двух оценок (табл. 4).

1. Оценка уровня влияния мероприятия на снижение риска («влияние»). Установлены три уровня влияния – малое, существенное и значительное.

2. Оценка уровня уверенности в том, что мероприятие будет внедрено («надежность»). Установлены три уровня надежности – низкая, средняя и высокая. Низкая надежность – заявлено, что снижение риска будет достигнуто, средняя – имеются доказательства (расчеты, тестирование), высокая – если сниже-

ние риска признано компетентной третьей стороной.

При этом JARUS не дает каких-либо указаний, как оценивается характеристика «влияние». Поэтому представляется целесообразным разработать дополнительную научно обоснованную методику ранжирования мероприятий по этой характеристике с использованием аппарата теории нечетких множеств.

Шаг 9 представляет собой составление описания особенностей зоны полетов без каких-либо конкретных оценок, а действия на **шаге 10** очевидны из схемы рис. 2 и не требуют дополнительных пояснений.

Таблица 5
Table 5

Мероприятия по управлению рисками БАС
UAS Risk Management Actions

№	Мероприятия
1	Поддержание буферной зоны – ширина зоны не менее высоты полета
2	Ограничения по району полета (при полетах БВС в районе аэродрома выделение для полета БВС специального коридора)
3	Ограничения по времени полета (планирование полетов БВС в районе аэродрома в период, когда пилотируемые ВС практически не летают)
4	Учет количества людей, подверженных риску в районе работ
5	При операции VLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и своевременное принятие мер
6	При операции EVLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и с помощью наблюдателя и своевременное принятие мер
7	Предусмотреть конструктивные доработки БВС, чтобы при падении на человека уменьшить риск (смерть человека не наступит)
8	Обязательное наличие у всех БВС системы ДАА (обнаружение пилотируемого ВС, принятие решения, передача команды на БВС, ее выполнение, обратная связь)
9	Удаленный экипаж обучен контролировать нештатную ситуацию
10	БВС адаптировано к неблагоприятным условиям внешней среды (ветер, осадки, обледенение, птицы)
11	Обеспечено безопасное восстановление БВС после технической проблемы или деградации линии С2 (резервирование, дублирование линии связи, системы экстренной посадки, парашют и т. д.)

3. Ранжирование мероприятий по их значимости с использованием метода анализа иерархий

Для иллюстрации методики составлен перечень типовых мероприятий по снижению риска для БП при эксплуатации БАС (табл. 5).

При определении уровня эффективности мероприятий по снижению риска инцидентов с участием БАС (табл. 5) все мероприятия были условно распределены на три группы по уровню их влияния: низкая, средняя и высокая. Однако конкретных указаний на то, какое мероприятие следует причислить к каждой конкретной группе, не дается. Вместе с тем для определения их эффективности эта информация, безусловно, необходима. Восстановление подобной иерархии возможно лишь с привлечением мнений экспертов. По-

следнее означает, что для решения этой задачи необходимо воспользоваться теорией нечетких множеств.

В качестве экспертов в данной работе выступили специалисты дирекции по СУБП АО «Кронштадт» – крупной российской организации, занимающейся разработкой, производством и эксплуатацией БАС.

Однако прямые экспертные оценки страдают излишним субъективизмом. Для уменьшения этого негативного аспекта обычно используют косвенные методы определения функции принадлежности (в нашем случае – для мероприятия) к числу мер, предотвращающих возможность инцидента. Обычно для этой цели используется метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [9].

В основе МАИ лежит обработка матрицы, полученной методом парных сравнений, когда эксперт попарно сравнивает значимость

различных методов и результаты записывает в виде матрицы $M = \|a_{ij}\|$, где a_{ij} – оценка экспертом отношения двух функций принадлежности μ_i/μ_j , в нашем случае – значимостей i -го и j -го мероприятий. В случае когда эксперт не допустил искажений при описании всех парных сравнений (гипотетический вариант – идеальное согласование матрицы), искомым вектор принадлежности $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ может быть найден как собственный вектор матрицы M , соответствующий максимальному собственному значению.

Т. Саати предложил использовать этот факт и при обработке реальных матриц парных сравнений, содержащих как некоторый субъективизм эксперта, так и погрешности, связанные с «квантованием» результатов сравнений (целочисленные оценки в таблице фундаментальной шкалы [10]). При этом в качестве коэффициента в уравнении должно использоваться максимальное собственное значение λ_{max} :

$$M\mu = \lambda_{max} \mu. \quad (1)$$

Построенная экспертом матрица парных сравнений должна удовлетворять ряду свойств [11–13], одно из которых, а именно, свойство совместности, обычно нарушается:

$$a_{ij} a_{jk} = \frac{\mu_i}{\mu_j} \frac{\mu_j}{\mu_k} = \frac{\mu_i}{\mu_k} = a_{ik}. \quad (2)$$

В работе [14] для устранения этого дефекта предложена следующая модификация МАИ. Среди всех парных сравнений a_{ij} можно выделить $(n - 1)$ элементов, на основе которых можно восстановить все остальные элементы матрицы M . В качестве примера автор рассматривает задание первой строки матрицы, когда эксперт по очереди сравнивает первый объект сначала со вторым, затем с третьим, затем с четвертым и т. д., до n -го включительно. То есть эксперт определяет все элементы множества $\{a_{1k}\}, k = \overline{2, n}$. Далее, используя свойства обратной симметрии мат-

рицы ($a_{ij} = \mu_i/\mu_j = (\mu_j/\mu_i)^{-1} = a_{ji}^{-1}$) и желаемое свойство совместности (2), можно вычислить любой недостающий элемент матрицы по формуле

$$a_{ij} = a_{i1} a_{1j} = a_{1j}/a_{1i}. \quad (3)$$

Построенная таким образом матрица абсолютно совместна.

Набор элементов, определяемых экспертом при таком подходе, следуя [14], назовем базисным. Очевидно, что базисный набор не единственный, но и не любая комбинация из $(n - 1)$ элементов матрицы M дает базисный набор. Так, например, для матрицы четвертого порядка их всего 16.

Здесь надо, однако, отметить следующее обстоятельство. Каждому базисному набору, в силу гипотезы о несовместности исходной матрицы парных сравнений, будет соответствовать своя, вообще говоря, не совпадающая с M матрица M_k и, соответственно, свой собственный вектор $\mu^k = (\mu_1^k, \mu_2^k, \dots, \mu_n^k)^T$. Это приводит к неоднозначности решения, усилению роли субъективизма в оценках эксперта: неясно, в каком из базисных наборов и сколько раз экспертом была допущена необъективность.

Естественным при этом видится представление ответа в виде среднего по всему ансамблю базисных наборов $\mu_{cp} = (1/N) \sum_k \mu^k$. Здесь N – число различных базисных наборов.

Наша гипотеза заключается в том, что собственный вектор для исходной, вообще говоря, несовместной матрицы парных сравнений следует трактовать как описанное выше среднее.

При ранжировании мероприятий будем полагать, что вся их совокупность представляет достаточный набор средств для предотвращения инцидентов с участием БАС. Поэтому далее будем полагать, что $\sum_i \mu_i = 1$.

Матрица парных сравнений, представленная коллективным экспертом АО «Кронштадт», имеет следующий вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 3 & 3 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 7 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 & 5 & 9 & 1 & 3 & 1 \\ 7 & 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 5 & 9 & 1/3 & 3 & 1 \\ 5 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 & 1 & 5 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 1 & 1 & 3 \\ 5 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1 & 5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 \\ 1/3 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1 & 1/7 & 1/3 & 1/7 \\ 7 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 7 & 1 \\ 1 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 5 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Решая задачу на собственные значения, собственные векторы для представленной матрицы, находим:

- максимальное собственное значение – $\lambda_{max} = 13,1271$;

- компоненты соответствующего вектора – $(0,0446, 0,0457, 0,2576, 0,0097, 0,0311, 0,1024, 0,0276, 0,1435, 0,1201, 0,0663, 0,1514)^T$.

В табл. 6 представлены результаты ранжирования мероприятий по их значимости на основе экспертных оценок.

Таблица 6
Table 6

Ранжирования мероприятий по их значимости на основе экспертных оценок
Ranking of actions by their significancy based on professional evaluation

Влияние	Мероприятия снижения риска	Важность мероприятия
Малое снижение риска	Учет количества людей, подверженных риску в районе работ	0,0097
	Предусмотреть конструктивные доработки БВС, чтобы при падении на человека уменьшить риск (смерть человека не наступит)	0,0276
	При операции VLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и своевременное принятие мер	0,0311
Существенное снижение риска	Поддержание буферной зоны – ширина зоны не менее высоты полета	0,0446
	Ограничения по району полета (при полетах БВС в районе аэродрома выделение для полета БВС специального коридора)	0,0457
	БВС адаптировано к неблагоприятным условиям внешней среды (ветер, осадки, обледенение, птицы)	0,0663
Значительное снижение риска	При операции EVLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и с помощью наблюдателя и своевременное принятие мер	0,1024
	Удаленный экипаж обучен контролировать нештатную ситуацию	0,1201
	Обязательное наличие у всех БВС системы DAA (обнаружение пилотируемого ВС, принятие решения, передача команды на БВС, ее выполнение, обратная связь)	0,1435
	Обеспечено безопасное восстановление БВС после технической проблемы или деградации линии С2 (резервирование, дублирование линии связи, системы экстренной посадки, парашют и т. д.)	0,1514
	Ограничения по времени полета (планирование полетов БВС в районе аэродрома в период, когда пилотируемые ВС практически не летают)	0,2576

Полученные оценки позволяют более обоснованно оценить эффективность мероприятий (табл. 4) и принимать решения об их внедрении при выполнении шагов 3 и 8 методики.

Заключение

Представлена в компактной форме методика оценки риска для безопасности полетов БАС категории В (специальной категории), основанная на разработках SORA группы JARUS. При этом предлагаемая методика адаптирована к условиям эксплуатации БАС в РФ и дополнена методом ранжирования мероприятий по степени влияния на снижение риска, что позволило конкретизировать некоторые элементы методики.

Очевидно, что оценки эффективности и ранжирование мероприятий с использованием аппарата теории нечетких множеств должны выполняться в каждой отдельной организации – операторе БАС экспертами этой организации с учетом отличий в парке БВС, концепции эксплуатации и районах полетов.

Методика может применяться для доказательства соответствия БАС категории В ожидаемым условиям эксплуатации, что предполагает ГОСТ Р 59517-2021.

Хотя методика предназначена прежде всего для эксплуатантов БАС, выполняющих полеты в сегрегированном воздушном пространстве, она предусматривает и оценки рисков столкновения с пилотируемыми ВС. Соответственно, предлагаемый подход к управлению риском может использоваться в ходе проводимых в настоящее время работ по формированию требований к БАС, полеты которых предполагаются в открытом воздушном пространстве с учетом задач, поставленных Правительством РФ в Концепции интеграции беспилотных воздушных судов в воздушное пространство Российской Федерации.

Авторы статьи выражают глубокую признательность специалистам АО «Кронштадт» за предоставление реальных экспертных оценок, которые были использованы в работе.

Список литературы

1. **Просвирина Н.В.** Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 560–575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619
2. **Xia J., Wang K., Wang S.** Drone scheduling to monitor vessels in emission control areas // Transportation Research Part B: Methodological. 2019. Vol. 119. Pp. 174–196. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.011
3. **Bhosale S.** Air Ambulance Drone (UAV) / S. Bhosale, S. Shelar, V. Anadkar, S. Pawar, S. Sarange // International Research Journal of Engineering and Technology. 2019. No. 6. Pp. 152–154.
4. **Wild G., Murray J., Baxter G.** Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters [Электронный ресурс] // Aerospace. 2016. Vol. 3, iss. 3. 22 p. DOI: 10.3390/aerospace3030022 (дата обращения: 27.01.2022).
5. **Шаров В.Д., Елисеев Б.П., Поляков П.М.** Об управлении безопасностью полетов при эксплуатации беспилотных авиационных систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 3. С. 42–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-42-56
6. **Murzilli L.** JARUS guidelines on specific operations risk assessment [Электронный ресурс] // JARUS. 26.06.2017. URL: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf (дата обращения: 27.01.2022).
7. **Terkildsen K.H., Jensen K.** Towards a tool for assessing UAS compliance with the JARUS SORA guidelines // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 11–14 June 2019. USA: Atlanta, GA, 2019. Pp. 460–466. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798236
8. **Perez-Casten J.A.** RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace / J.A. Pérez-Castána, F.G. Comendadora, A. Rodríguez-SanzaI, I.A. Cabreraa, J. Torrecilla // Safety Science. 2019. Vol. 111. Pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.018

9. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Р.Г. Вахнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

10. Саати Т.Л. Об измерении неосознанного. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений [Электронный ресурс] // Cloud of Science. 2015. Т. 2, № 1. С. 5–39. URL: http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/CoS_2_1.pdf (дата обращения: 27.01.2022).

11. Богаченко Н.Ф., Лавров Д.Н. Об особенностях реализации интервального метода анализа иерархий в задаче оценки эффективности работы службы занятости // Математические структуры и моделирование. 2020. № 4 (56). С. 41–48. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.41-48

12. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г. Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения // Экономика и управление. 2016. № 8 (130). С. 60–65.

13. Воскобинский М.Ю., Пекарская О.А., Рази Д.А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Экономика и управление народным хозяйством. 2016. № 2. С. 33–42.

14. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44, № 7. С. 1261–1270.

References

1. Prosvirina, N.V. (2021). *Analysis and prospects for the development of unmanned aircraft*. Moskovskiy ekonomicheskij jurnal, no. 10, pp. 560–575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619 (in Russian)

2. Xia, J., Wang, K. & Wang, S. (2019). *Drone scheduling to monitor vessels in emission control areas*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 119, pp. 174–196. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.011

3. Bhosale, S., Shelar, S., Anadkar, V., Pawar, S. & Sarange, S. (2019). *Air Ambulance Drone (UAV)*. International Research Journal of Engineering and Technology, no. 6, pp. 152–154.

4. Wild, G., Murray, J. & Baxter, G. (2016). *Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters*. Aerospace, vol. 3, issue 3, 22 p. DOI: HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.3390/aerospace3030022>"10.3390/aerospace3030022 (accessed: 27.01.2022).

5. Sharov, V.D., Eliseev, B.P. & Polyakov, P.M. (2021). *About flight safety management during operation of unmanned aircraft systems*. Civil Aviation High Technologies, vol. 24, no. 3, pp. 42–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-42-56 (in Russian)

6. Murzilli, L. (2017). *JARUS guidelines on specific operations risk assessment*. JARUS. 26.06.2017. Available at: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf (accessed: 27.01.2022).

7. Terkildsen, K.H. & Jensen, K. (2019). *Towards a tool for assessing UAS compliance with the JARUS SORA guidelines*. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, GA, USA, pp. 460–466. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798236

8. Pérez-Castána, J.A., Comendador, F.G., Rodríguez-Sanzal, A., Cabrerá, I.A. & Torrecilla, J. (2019). *RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace*. Safety Science, vol. 111, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.018

9. Saati, T.L. (1993). [Decision-making. Method of hierarchy analysis]. Translated from English by R.G. Vachnadze. Moscow: Radio i svyaz, 278 p. (in Russian)

10. Saati, T.L. (2015). *On the measurement of intangibles. A principal eigenvector approach to relative measurement derived from paired comparisons*. Cloud of Science, vol. 2, no. 1, pp. 5–39. Available at: http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/CoS_2_1.pdf (accessed: 27.01.2022). (in Russian)

11. Bogachenko, N.F. & Lavrov, D.N. (2020). *On the features of the implementation of the interval method for analytic hierarchy process in the problem of assessing the effectiveness of the employment service*. Mathematical Structures and Modeling, no. 4 (56), pp. 41–48. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.41-48 (in Russian)

12. **Korobov, V.B. & Tutygin, A.G.** (2016). *Problems of the analytic hierarchy process and some solutions*. Economics and management, no. 8 (130), pp. 60–65. (in Russian)

13. **Voskobinsky, M.Yu., Pekar-skaya, O.A. & Razi, D.A.** (2016). [*Decision making based on the hierarchy analysis method*].

Ekonomika i upravleniye narodnym kho-zyaystvom, no. 2, pp. 33–42. (in Russian)

14. **Nogin, V.D.** (2004). [*A simplified version of the hierarchy analysis method based on nonlinear criteria convolution*]. Zhurnal Vychislitelnoi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki, vol. 44, no. 7, pp. 1261–1279. (in Russian)

Сведения об авторах

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, v.sharov@mstuca.aero.

Кузнецов Валерий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики МГТУ ГА, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Поляков Павел Михайлович, старший преподаватель кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, p.polyakov@mstuca.aero.

Information about the authors

Valeriy D. Sharov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.sharov@mstuca.aero.

Valeriy L. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Applied Mathematics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Pavel M. Polyakov, Senior Lecturer, The Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, p.polyakov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 14.07.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 14.07.2022
Accepted for publication 24.11.2022

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 004.942

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-77-90

Определение основных характеристик пространственного маневра «переворот самолета» с ограничителем предельных режимов

К.А. Журавский¹, П.С. Костин¹

*¹Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия*

Аннотация: В связи постоянным расширением эксплуатационного диапазона современных маневренных боевых самолетов, с ростом требований, предъявляемых к государственным испытаниям, все более необходимым является исследование всего эксплуатационного диапазона в целом и определение основных характеристик отдельно взятых маневров в частности. В настоящее время в основе государственных испытаний лежит летный натурный эксперимент, который невыгоден с точки зрения стоимости, длительности проведения и охвата всего эксплуатационного диапазона самолета. Одними из перспективных направлений совершенствования государственных испытаний являются полунатурное моделирование и комплексное имитационное моделирование. В статье представлены различные способы определения основных характеристик пространственного маневра «переворот», к которым относятся расчетный способ, полунатурное моделирование и имитационное моделирование. Под расчетным способом понимаются расчетные формулы, выраженные из системы уравнений движения центра масс летательного аппарата. Полунатурное моделирование проводилось на пилотажно-моделирующем стенде летчиками-операторами. Имитационное моделирование проводилось с использованием комплексной имитационной модели самолета, в состав которой входит модель управляющих действий летчика, основанная на нечеткой логике. В статье приведено описание, преимущества и недостатки, сравнение между собой результатов каждого из способов. Расчетный способ, несмотря на свою быстроту, является самым неточным способом из-за сложности и невозможности определения осредненных параметров полета. Также данный способ не учитывает такие факторы, как полетная конфигурация самолета, атмосферные возмущения, закон управления летчика, логику работы ограничителя предельных режимов. Результаты полунатурного моделирования показали, что данный способ является более точным, чем расчетный, но сложным и долгим в плане организации и выполнения экспериментов. Анализ исследования показал, что наиболее приемлемым способом определения основных характеристик переворота является имитационное моделирование на комплексной имитационной модели самолета, потому что данный способ в значительной степени позволяет экономить финансовые и временные ресурсы, затрачиваемые на государственные летные испытания.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, комплексная имитационная модель самолета, модель управляющих действий летчика, нечеткая логика, маневренные характеристики самолета, ограничитель предельных режимов, комплексная система управления.

Для цитирования: Журавский К.А., Костин П.С. Определение основных характеристик пространственного маневра переворот самолета с ограничителем предельных режимов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 77–90.
DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-77-90

Determination of main performance data of an aircraft three-dimensional maneuver split-S with a permissible flight envelope limiter

K.A. Zhuravsky¹, P.S. Kostin¹

¹ Air Force Education and Research Center "The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia

Abstract: Due to a steady extension of the flight envelope of modern agile combat aircraft, with the growing requirements for state tests, it is increasingly necessary to study the entire flight envelope and specifically, to determine the main performance data of individual maneuvers. Currently, state tests are based on a flight full-scale experiment, which is cost-ineffective in terms of cost, duration, and limit lines of the flight envelope. The accelerating trends to update state tests are semirealistic simulation and complex simulation modeling. The article presents the various techniques to determine main performance data of a three-dimensional maneuver split-S, which include the calculation method, semirealistic simulation, and simulation modeling. The calculation method is understood as calculation formulas expressed from the system of equations for motion of the aircraft mass center. Semirealistic simulation was carried out using a flight-simulation stand by operator pilots. Simulation modeling was conducted using a complex simulation model of an aircraft, consisting of a pilot's control actions model based on fuzzy logic. The article provides the description, advantages and disadvantages, comparison of the results of each of the techniques. The calculation method, despite its efficiency, is the most inaccurate due to the complexity and inability to define the average flight parameters. Additionally, this method does not take into consideration such factors as the aircraft flight configuration, atmospheric disturbances, the pilot's command profile, the logic of the permissible flight envelope limiter operation. The results of semirealistic simulation showed that this method is more accurate than the calculation one, but complex and time consuming in terms of the organization and execution of experiments. The analysis of the study illustrated that the most appropriate way to determine main performance data of split-S is simulation modeling on a complex simulation model of the aircraft, because the given method considerably saves financial and time resources used on state flight tests.

Key words: semirealistic simulation, complex simulation model of the aircraft, pilot's command profile, fuzzy logic, maneuvering performance data of the aircraft, permissible flight envelope limiter, complex control system.

For citation: Zhuravsky, K.A. & Kostin, P.S. (2022). Determination of main performance data of an aircraft threedimensional maneuver split-S with a permissible flight envelope limiter. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 77–90. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-77-90

Введение

Для всех современных маневренных боевых самолетов, поступающих на вооружение Воздушно-космических сил Российской Федерации (ВКС РФ), в рамках государственных испытаний необходимо определить маневренные характеристики для всего эксплуатационного диапазона [1, 2]. Маневренные характеристики используются для построения областей выполнимости пространственных маневров, представленных в документации по летной эксплуатации. На основе анализа маневренных характеристик инженеры-конструкторы проводят настройку алгоритмов современных комплексных систем управления (КСУ) [3], составной частью которых является ограничитель предельных режимов (ОПР). Результатом такой настройки является достижение самолетом приемле-

мых пилотажных характеристик. Как правило, маневренные характеристики определяются в летных (натурных) испытаниях, в которых по объективным причинам охватить весь перечень данных характеристик невозможно. К таким причинам относятся:

- опасность выполнения некоторых режимов, находящихся на границе эксплуатационного диапазона, выход за границу которого может привести к попаданию самолета в критические режимы полета, что становится причиной авиационного происшествия;
- дороговизна и длительность проведения летных испытаний;
- невозможность реализации определенных внешних возмущений из-за случайного характера их появления.

Одним из способов решения проблемы определения маневренных характеристик яв-

ляется математическое моделирование на различных этапах испытаний [4]. Имея адекватные математические модели динамики движения самолета, комплексной системы управления, атмосферы и атмосферных возмущений, можно определить характеристики во всем эксплуатационном диапазоне для всего перечня выполняемых пространственных маневров.

Одним из наиболее опасных пространственных маневров является переворот. Переворот – фигура пилотажа, при выполнении которой самолет поворачивается относительно продольной оси на 180° с последующим движением по нисходящей траектории в вертикальной плоскости и выводом в горизонтальный полет в направлении, обратном вводу. Переворот применяется при атаке наземной (морской) цели, для атаки воздушного противника, летящего ниже на встречном курсе, в качестве оборонительного маневра при уклонении от атак истребителя, при противоракетном и противозенитном маневрировании [5].

При выполнении переворота на динамику пространственного движения самолета оказывает влияние большое количество факторов (внутренние: аэродинамические, массовые, инерционные характеристики; особенности работы системы управления; характер ручного управления и др.; внешние: турбулентность атмосферы; рельеф местности), влияние которых в рамках летных экспериментов не представляется возможным оценить. Следовательно, существует необходимость в исследовании этого режима полета путем математического моделирования.

К основным маневренным характеристикам переворота относятся:

- потеря высоты ΔH за маневр;
- прирост скорости ΔV за маневр;
- средняя угловая скорость $\omega_{z\text{cp}}$ на маневре;
- время выполнения маневра $t_{\text{пер}}$;
- средняя нормальная перегрузка $n_{y\text{cp}}$ на маневре;
- средний угол атаки α_{cp} на маневре;
- средняя скорость V_{cp} на маневре.

Описание расчетных способов определения основных характеристик переворота

Одним из способов определения маневренных характеристик на перевороте являются классические формулы из динамики полета и практической аэродинамики. Такие формулы выводятся из системы уравнений движения центра масс летательного аппарата (ЛА) [6].

Предварительная оценка потери высоты ΔH за время выполнения маневра является важным фактором безопасного завершения переворота и определяется формулой

$$\Delta H = \frac{2V_{\text{cp}}^2}{gn_{y\text{cp}}}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Более точно потерю высоты за переворот можно оценить по формуле (2), которая предполагает что первая половина маневра, соответствующая изменению угла наклона траектории от $\theta = 0$ до $\theta = -90^\circ$, выполняется при постоянном коэффициенте подъемной силы $C_y = \text{const}$. Рост скорости сопровождается увеличением нормальной перегрузки с последующим ее ограничением на заданном уровне ($n_y = \text{const}$) во второй половине маневра.

$$\Delta H = \frac{1}{g} \left(\frac{2p}{\rho_{H\text{cp}} C_{y\text{cp}}} + \frac{V_{\text{cp}}^2}{n_{y\text{cp}}} \right), \quad (2)$$

где $p = \frac{G}{S}$ – удельная нагрузка на крыло, G – вес самолета, S – площадь крыла, $\rho_{H\text{cp}}$ – средняя плотность воздуха, $C_{y\text{cp}}$ – среднее значение коэффициента подъемной силы в первой половине маневра.

Средняя скорость тангажа $\omega_{z\text{cp}}$ является важной характеристикой, поскольку ее величина определяет время выполнения перево-

рота. Величина средней угловой скорости определяется по формулам

$$\omega_{z\text{ ср}} = \frac{1}{p} g C_{y\text{ ср}} \rho_{H\text{ ср}} V_{\text{ср}}; \quad (3)$$

$$\omega_{z\text{ ср}} = \frac{g n_{y\text{ ср}}}{V_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

Время выполнения переворота $t_{\text{пер}}$ определяется по величине средней угловой скорости по формуле

$$t_{\text{пер}} = \frac{\pi}{\omega_{z\text{ ср}}}. \quad (5)$$

Прирост скорости за переворот ΔV зависит от времени выполнения переворота и значения среднего тангенциального ускорения $j_{x\text{ ср}}$ и определяется по формуле

$$\Delta V = j_{x\text{ ср}} t_{\text{пер}}. \quad (6)$$

Формулы (1)–(6) дают возможность быстро определить необходимые параметры, но существенным недостатком представленного выше способа определения маневренных характеристик переворота является большая ошибка из-за большой погрешности при расчете средних значений параметров $V_{\text{ср}}$, $n_{y\text{ ср}}$, $\rho_{H\text{ ср}}$, $C_{y\text{ ср}}$, $j_{x\text{ ср}}$.

Описание полунатурного исследования для определения маневренных характеристик переворота

Одним из способов минимизировать ошибку в определении маневренных характеристик переворота является полунатурное моделирование [7]. Для полунатурного моделирования необходимо:

1) иметь пилотажно-моделирующий комплекс (рис. 1) [8], в состав которого входят: элементы кабины исследуемого самолета

с арматурой, система визуализации закабинной обстановки, информационное поле кабины (многофункциональный цифровой индикатор и индикатор на лобовом стекле), ручка управления самолетом (РУС) с электромеханической системой загрузки, системы измерения усилий на РУС;

2) иметь адекватную (схожую с реальным прототипом) математическую модель самолета, состоящую из математической модели динамики пространственного движения самолета, математической модели КСУ, в состав которой входят алгоритмы ОПР;

3) разработать методику полунатурного исследования, в которой определены: цель исследования, частные задачи исследования, структура полунатурных экспериментов, исходные данные и начальные условия каждого моделирования;

4) иметь в наличии строевых летчиков с необходимым уровнем летной квалификации в зависимости от цели исследования.

Для определения основных маневренных характеристик типового истребителя, выполняющего различные типы маневров с нормальными перегрузками в диапазоне от -3 до 9 единиц и углами атаки от -7 до 26° , было проведено полунатурное исследование. Модель исследуемого самолета по аэродинамическим, массовым и геометрическим характеристикам схожа с серийным истребителем, стоящим на вооружении ВКС РФ. Полунатурное моделирование структурно можно представить в виде схемы (рис. 2), основным элементом которой является модель динамики пространственного движения самолета [9, 10]. Она состоит из блоков: реального времени, банка аэродинамических характеристик самолета, расчета аэродинамических сил и моментов, модели силовой установки, системы дифференциальных уравнений, комплексной системы управления (КСУ) с алгоритмами ОПР. Кроме того, на рисунке изображен ввод в модель динамики пространственного движения самолета начальных условий моделирования и вывод результатов моделирования, на основе которых делается экспресс-анализ данных. Экспресс-анализ позволяет оперативно определить качество проведенного полунатурного



Рис. 1. Пилотажно-моделирующий стенд современного маневренного самолета
Fig. 1. The flight simulator of the modern agile combat aircraft

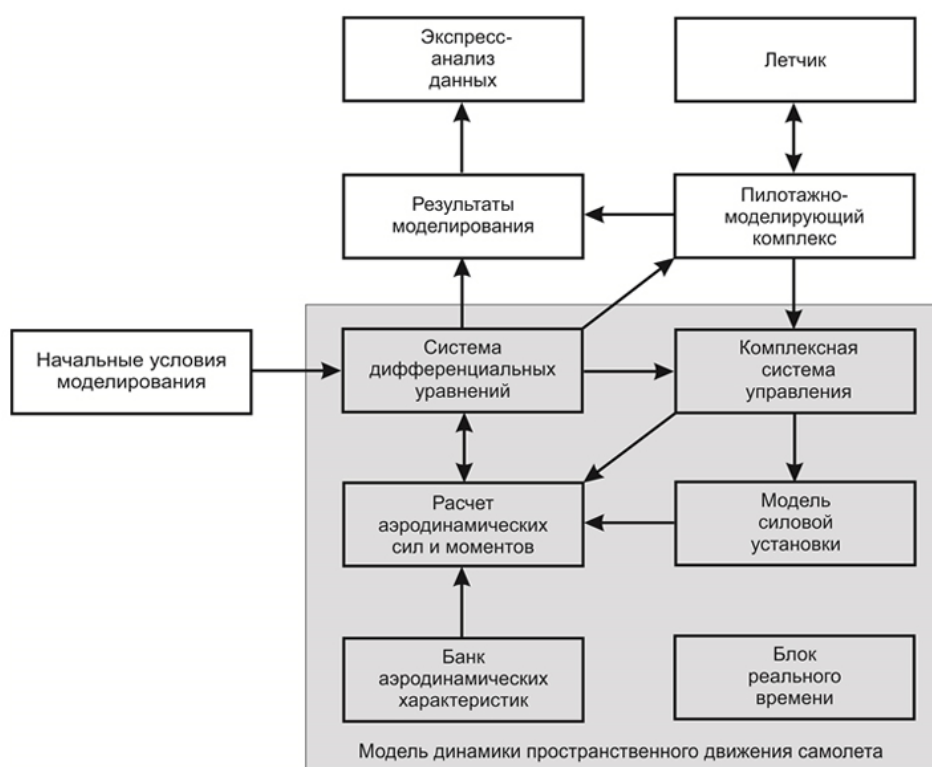


Рис. 2. Структурная схема полунатурного моделирования
Fig. 2. The block diagram of semirealistic simulation

эксперимента, основываясь на графиках основных параметров полета. Также на рисунке изображен пилотажно-моделирующий комплекс и летчик, взаимодействующий с этим комплексом. Модель динамики простран-

ственного движения самолета реализована в пакете Simulink программно-моделирующего комплекса Matlab [11].

Полунатурный эксперимент проводился с участием трех летчиков, имеющих опыт пи-

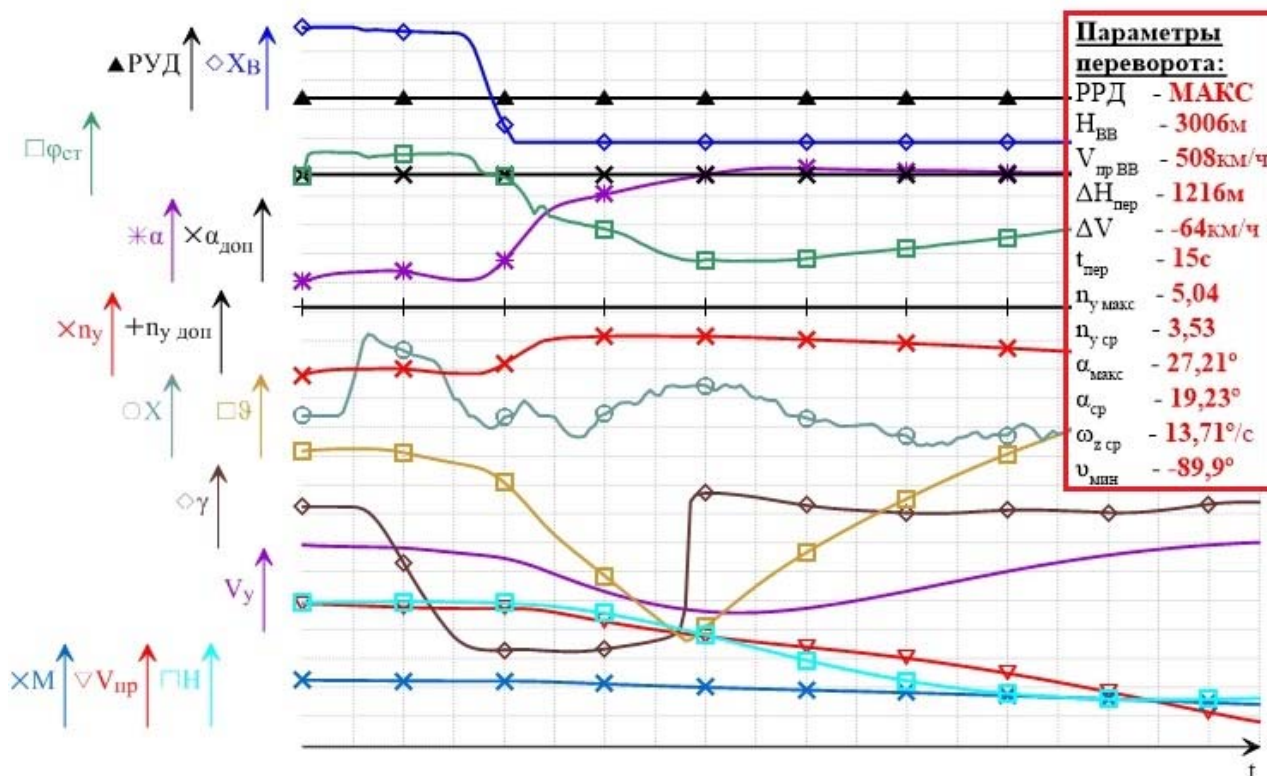


Рис. 3. Параметры полета и основные характеристики переворота при полунатурном моделировании
Fig. 3. Flight parameters and main performance data of split-S under semirealistic simulation

лотирования на исследуемом самолете. Полунатурное исследование заключалось в многократном выполнении переворота (по 10 реализаций каждым летчиком) при трех начальных условиях ($V_{\text{ВВ}}$ – скорость ввода в маневр, $H_{\text{ВВ}}$ – высота ввода в маневр):

- 1) $V_{\text{ВВ}} = 300$ км/ч, $H_{\text{ВВ}} = 4000$ м;
- 2) $V_{\text{ВВ}} = 500$ км/ч, $H_{\text{ВВ}} = 3000$ м;
- 3) $V_{\text{ВВ}} = 1000$ км/ч, $H_{\text{ВВ}} = 6500$ м.

Все полунатурные эксперименты проводились с режимом работы двигателей (РРД) – максимальным («МАКС»), с конфигурацией (вариантом подвесок) – 4 ракеты класса «воздух – воздух», с заправкой равной 0,5 от полной заправки. Для получения статистически достоверных результатов было выполнено 30 экспериментальных переворотов для каждого из условий.

Результаты каждой отдельно взятой реализации представлялись в виде основных параметров полета (рис. 3) и далее обрабатывались в программе [12], разработанной в мат-

ричной лаборатории Matlab. Обработка заключалась в определении основных маневренных характеристик переворота (красная рамка «Параметры переворота» на рис. 3).

Для доказательства того, что полунатурное моделирование максимально достоверно и имеет минимальную ошибку в отличие от расчетных формул, было проведено сравнение результатов полунатурного моделирования и расчета по формулам с результатами реальных полетов.

Результаты сравнения представлены в табл. 1–4, в каждой из которых указаны: определяемая маневренная характеристика (название таблицы), способ определения характеристики (строки таблицы), начальные условия ввода в маневр – $V_{\text{ВВ}}$ и $H_{\text{ВВ}}$ (столбцы таблицы). В таблицах указаны разности маневренных характеристик реального полета от результатов полунатурного моделирования и расчетов формульных зависимостей (1)–(6):

$$\Delta A_j^i = A_{\text{РП}}^i - A_j^i, \quad (7)$$

Таблица 1
Table 1

Сравнение разностей потерь высоты ΔH , м
Comparison of altitude loss differences ΔH , m

Способ определения (j) \ Начальные условия (i)	Условие 1: $H_{\text{вв}} = 4000$ м, $V_{\text{вв}} = 300$ км/ч	Условие 2: $H_{\text{вв}} = 3000$ м, $V_{\text{вв}} = 500$ км/ч	Условие 3: $H_{\text{вв}} = 6500$ м, $V_{\text{вв}} = 1000$ км/ч	$\Delta \bar{A}_j \pm \sigma$
Реальный полет (РП)	0	0	0	0
Полунатурное моделирование (ПМ)	-82	-61	254	37 ± 188
Формула 1 (Ф1)	872	415	-1645	-119 ± 1341
Формула 2 (Ф2)	360	184	-687	-48 ± 561

где ΔA_j^i – разность исследуемых маневренных характеристик, $A_j^i = \{\Delta H, \Delta V, \omega_{z \text{ ср}}, t_{\text{пер}}\}$ – исследуемая маневренная характеристика, i – номер условия, $j = \{\text{РП, ПМ, Ф1, Ф2, ...}\}$ – способ определения (РП – данные реального полета, ПМ – результаты полунатурного моделирования, Ф1 – расчет по формуле (1), Ф2 – расчет по формуле (2) и т. д.).

В пятом столбце табл. 1–4 указаны средние арифметические разностей маневренных характеристик $\Delta \bar{A}_j$ и их стандартные отклонения σ .

В табл. 1 представлены результаты сравнения разностей потерь высоты. Проанализировав средние арифметические разностей маневренных характеристик и их стандартные отклонения, можно сделать вывод, что максимально достоверным из представленных способов определения потери высоты на перевороте является полунатурное моделирование, потому что результаты, полученные в нем, имеют минимальные среднее арифметическое разностей потерь высоты и стандартное отклонение 37 ± 188 м.

В табл. 2 представлены результаты сравнения разностей приростов скоростей. Полунатурное моделирование является единственным способом определения прироста

скорости с небольшой погрешностью -11 ± 94 км/ч. По формуле (6) оценить прирост скорости невозможно, потому что среднее тангенциальное ускорение определяется по формуле (8). Здесь, чтобы определить среднее значение выражения в квадратных скобках, необходимо в каждый момент времени знать значения всех параметров выражения. Расчетными формулами это сделать невозможно.

$$j_{x \text{ ср}} = \left[\frac{\omega_z V}{n_y} (n_x - \sin \Theta) \right]_{\text{ср}}, \quad (8)$$

где n_x – тангенциальная перегрузка, Θ – угол наклона траектории.

В табл. 3 представлены результаты сравнения разностей угловых скоростей тангажа. Здесь полунатурное моделирование является самым точным способом определения и имеет минимальную ошибку $1,6 \pm 1,5$ °/с.

В табл. 4 представлены результаты сравнения разностей времен маневров. Проанализировав средние арифметические разностей маневренных характеристик и их стандартные отклонения, можно сделать вывод, что максимально достоверным из представленных способов определения времени маневра

Таблица 2
Table 2

Сравнение разностей приростов скоростей ΔV , км/ч
Comparison of speed increments differences ΔV , km/h

Способ определения (j) \ Начальные условия (i)	Условие 1: $H_{\text{вв}} = 4000$ м, $V_{\text{вв}} = 300$ км/ч	Условие 2: $H_{\text{вв}} = 3000$ м, $V_{\text{вв}} = 500$ км/ч	Условие 3: $H_{\text{вв}} = 6500$ м, $V_{\text{вв}} = 1000$ км/ч	$\Delta \bar{A}_j \pm \sigma$
Реальный полет (РП)	0	0	0	0
Полунатурное моделирование (ПМ)	-69	-85	122	-11 ± 94
Формула 6 (Ф6)	Не определяется, т. к. $j_{x \text{ ср}}$ неизвестно			

Таблица 3
Table 3

Сравнение разностей угловых скоростей тангажа $\omega_{z \text{ ср}}$, °/с
Comparison of differences in angular pitch velocities $\omega_{z \text{ ср}}$, °/s

Способ определения (j) \ Начальные условия (i)	Условие 1: $H_{\text{вв}} = 4000$ м, $V_{\text{вв}} = 300$ км/ч	Условие 2: $H_{\text{вв}} = 3000$ м, $V_{\text{вв}} = 500$ км/ч	Условие 3: $H_{\text{вв}} = 6500$ м, $V_{\text{вв}} = 1000$ км/ч	$\Delta \bar{A}_j \pm \sigma$
Реальный полет (РП)	0	0	0	0
Полунатурное моделирование (ПМ)	1,4	0,3	3,2	$-1,6 \pm 1,5$
Формула 3 (Ф3)	12,3	14,6	13,1	$13,3 \pm 1,1$
Формула 4 (Ф4)	9,1	12,5	12,6	$11,4 \pm 2$

на перевороте является полунатурное моделирование, потому что результаты, полученные в нем, имеют минимальную ошибку $1,3 \pm 0,5$ с.

В результате анализа данных, представленных в табл. 1–4, выявлено, что максимально достоверным способом определения основных маневренных характеристик переворота является полунатурное моделирование.

Описание эксперимента по определению маневренных характеристик переворота на комплексной имитационной модели самолета

Проведение полунатурного эксперимента связано с определенными трудностями:

- поиск и подбор летного состава с необходимым уровнем летной квалификации;

Таблица 4
Table 4

Сравнение разностей времен маневров $t_{\text{пер}}$, с
Comparison of maneuver time differences $t_{\text{пер}}$, s

Способ определения (j) \ Начальные условия (i)	Условие 1: $H_{\text{ВВ}} = 4000$ м, $V_{\text{ВВ}} = 300$ км/ч	Условие 2: $H_{\text{ВВ}} = 3000$ м, $V_{\text{ВВ}} = 500$ км/ч	Условие 3: $H_{\text{ВВ}} = 6500$ м, $V_{\text{ВВ}} = 1000$ км/ч	$\Delta \bar{A}_j \pm \sigma$
Реальный полет (РП)	0	0	0	0
Полунатурное моделирование (ПМ)	1,7	0,8	1,5	$1,3 \pm 0,5$
Формула 5 (Ф5)	-33,9	-68,7	-248,4	$-117 \pm 115,1$

- значительные временные затраты, приводящие к отвлечению летного состава от повседневной служебной деятельности, а также длительные по времени эксперименты уменьшают достоверность результатов из-за накопленной усталости летчиков;
- необходимость создания пилотажно-моделирующего комплекса с актуальными арматурой и информационным полем кабины исследуемого самолета, с системой визуализации закабинной обстановки, с системой загрузки РУС и снятия усилий с нее.

Решить данные проблемы можно применив комплексную имитационную модель самолета, в состав которой входит:

- модель динамики пространственного движения самолета, аналогичная используемой в полунатурном моделировании;
- модель управляющих действий летчика [13, 14], основанная на нечеткой логике [15].

Существует множество способов формирования математической модели управляющих действий летчика, а именно:

- квазилинейные алгоритмы;
- пропорциональные интегральные дифференциальные регуляторы;
- нейронные сети;
- генетические алгоритмы;
- нечеткая логика.

У каждого из способов есть свои преимущества и недостатки, а также каждый из спо-

собов в разной мере нашел свою реализацию в моделировании управляющих действий летчика. Опыт кафедры № 72 авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) в моделировании управляющих действий летчика позволяет сделать вывод, что наиболее подходящим из перечисленных выше способов является нечеткая логика [16, 17]. Многочисленные исследования применения нечеткой логики в моделировании управляющих действий летчика выявили, что данный инструмент является простым и быстрым в освоении, потому что в его основе лежит база данных, сформированная из логических правил. Эти правила отражают логику управления летчика в реальном полете и формируются на основе:

- изучения порядка выполнения маневра;
- наблюдения за летчиком в процессе выполнения маневра, обратив особое внимание на динамику работы с органами управления и распределением внимания по информационному полю кабины;
- анализа материалов полетной информации и результатов полунатурного моделирования;
- экспертной оценки летчика и беседы с ним с целью выявления особенностей выполнения маневра, основанных на субъективном опыте пилотирования.

Также современные методы оптимизации позволяют «обучить» модель управляющих действий летчика, основанную на нечеткой логике, для любой выборки данных, сделав ее максимально приближенной к управляющим действиям реального летчика, на основе результатов полета которого и формировалась эта выборка данных.

Модель управляющих действий летчика, основанная на нечеткой логике [18], состоит из нечетких пропорционально-дифференциальных регуляторов для каждого канала управления. На вход каждого регулятора подаются два сигнала – управляемый параметр и его дифференциал (скорость изменения, демпфирующая часть). С помощью базы знаний, сформированной в результате наблюдения за действиями летчиков, их экспертных оценок и изучения порядка выполнения маневра и представленной в виде набора логических правил, после дефаззификации определяется выходной сигнал. Выходной сигнал – скорость перемещения РУС, которая после интегрирования, преобразуется в величину перемещения РУС. Модель управляющих действий летчика, основанная на нечеткой логике, позволяет также учесть логику работы современных астатических алгоритмов ОПР.

Для построения модели управляющих действий летчика, основанной на нечеткой логике, проводился анализ характеристик управления (величины и скорости отклонения РУС) и кинематических параметров полета в поперечном и продольном каналах управления при полунатурном моделировании. Этот анализ привел к созданию адекватной модели управляющих действий летчика, имеющей высокую сходимость с результатами полунатурного моделирования. На рис. 4 изображены графики результатов полунатурного моделирования и моделирования с помощью комплексной имитационной модели в поперечном канале управления. На первых двух графиках изображены характеристики управления по времени t (X_3 – отклонение РУС по крену, dX_3/dt – скорость отклонения РУС крену). На графиках 3 и 4 изобра-

жены изменения кинематических параметров полета по времени (γ – угол крена, ω_x – угловая скорость крена). По графикам наблюдается высокая сходимость результатов полунатурного эксперимента с экспериментом, в котором результаты получены путем применения комплексной имитационной модели.

На рис. 5 представлены графики результатов полунатурного моделирования и моделирования комплексной имитационной модели самолета (имитационное моделирование). Исследование проводилось по определению потери высоты на всем эксплуатационном диапазоне скоростей ввода в маневр и высоте ввода в маневр, соответствующей нижней границе выполнимости переворота. Также на рисунке представлены данные из РЛЭ. По рисунку наблюдается высокая сходимость результатов, что свидетельствует об адекватности комплексной имитационной модели самолета.

Заключение

Таким образом, в ходе анализа результатов исследований в области динамики полета самолетов с ограничителями предельных режимов при выполнении пространственного маневра «переворот» установлено, что полунатурное моделирование соответствует реальному испытательному полету. Это свидетельствует об адекватности математической модели пространственного движения самолета. Однако полунатурное исследование связано с рядом трудностей (временные затраты, пилотажно-моделирующий комплекс, привлечение летного состава и т. д.). Эти трудности решаются применением комплексной имитационной модели самолета, в состав которой входит модель управляющих действий летчика, основанная на нечеткой логике. Данный инструмент, имея высокую сходимость результатов, значительно повысит безопасность летных экспериментов и позволит сократить временные и финансовые затраты при испытаниях АТ.

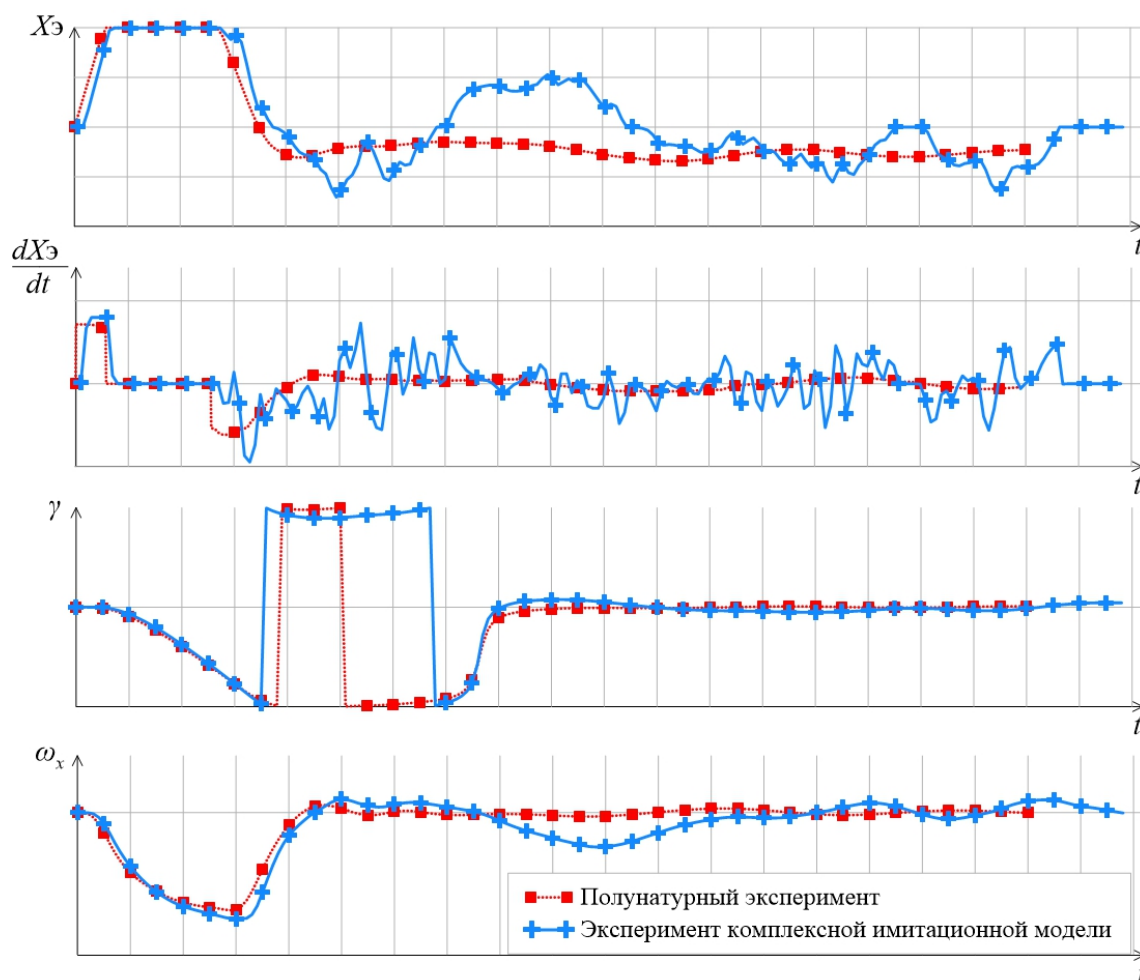


Рис. 4. Сравнение результатов полунатурного эксперимента и эксперимента с использованием комплексной имитационной модели в поперечном канале управления

Fig. 4. Comparison of the results of a semirealistic experiment and an experiment using a complex simulation model in a transverse control channel

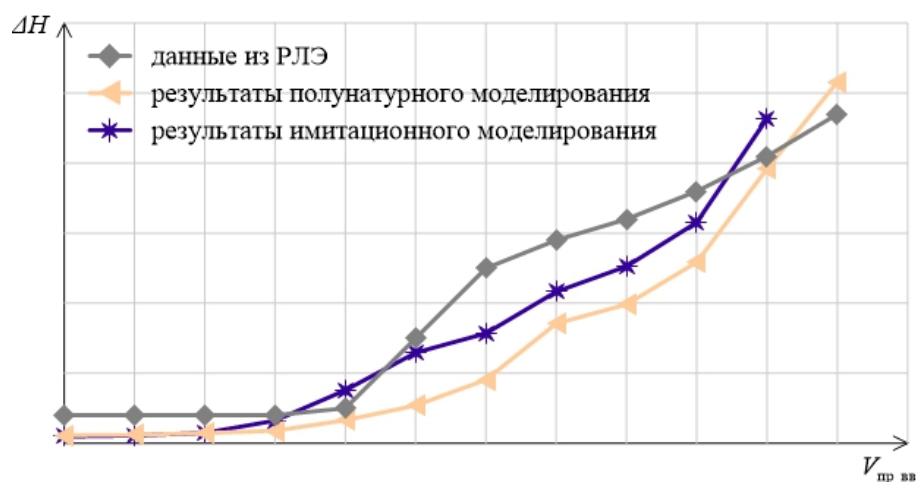


Рис. 5. Сравнение результатов полунатурного и имитационного моделирования с данными из РЛЭ

Fig. 5. Comparison of the results of semirealistic and simulation modeling with data from the FM

Список литературы

1. **Мышкин Л.В.** Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 304 с.

2. **Robinson T.** Train virtual, fight easy [Электронный ресурс] // Royal aeronautical society. 2017. No. 6 (44). Pp. 16–19. URL: <https://www.aerosociety.com/news/train-virtual-fight-easy> (дата обращения: 12.01.2022).

3. **Heinemann S., Müller H.A., Suleman A.** Toward smarter autoflight control system infrastructure [Электронный ресурс] // Journal of Aerospace Information Systems. 2018. Vol. 15, no. 6. Pp. 353–365. DOI: 10.2514/1.I010565 (дата обращения: 12.01.2022).

4. **Бизин Г.А., Тихонов В.Н., Торопов В.А.** Определение характеристик устойчивости и управляемости самолетов в летных испытаниях: монография. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2013. 410 с.

5. **Левицкий С.В., Свиридо Н.А.** Динамика полета: учебник для вузов / Под ред. С.В. Левицкого. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 526 с.

6. **Икрянников Е.Д., Иськуо А.С., Левицкий С.В. и др.** Самолет Як-130УБС. Аэродинамика и летные характеристики / Под ред. В.А. Подобедова, К.Ф. Поповича. М.: Машиностроение, 2015. 346 с.

7. **Верещагин Ю.О.** Применение полунатурного моделирования для исследования пилотажных характеристик самолетов на кафедре авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов / Ю.О. Верещагин, П.С. Костин, Т.А. Подкуйко, Д.В. Верещиков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 11-2. С. 12–14.

8. **Костин П.С., Верещагин Ю.О., Волошин В.А.** Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2015. № 81. 30 с. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57735> (дата обращения: 12.01.2022).

9. **Бейлин В.П., Нараленков М.К.** Пространственная модель полета самолета при ручном автоматизированном управлении // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского, 2015. № 3. С. 85–89.

10. **Журавский К.А., Филатов В.К.** Создание модели динамики продольного движения самолета в программно-моделирующем комплексе Matlab@Simulink // Гагаринские чтения – 2020: сборник тезисов докладов XLVI Международной молодежной научной конференции, Москва, 14–17 апреля 2020 г. М.: МАИ, 2020. С. 117.

11. **Верещиков Д.В., Разуваев Д.В., Костин П.С.** Прикладная информатика: Применение Matlab@Simulink для решения практических задач: учеб. пособие. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 104 с.

12. **Журавский К.А., Костин П.С., Филатов В.К.** Определение параметров безопасного режима эксплуатации маневренного самолета при выполнении переворота. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663754. Дата гос. регистрации 23.08.2021.

13. **Ефремов А.В.** Система самолет – летчик. Закономерности и математическое моделирование поведения летчика: монография. М.: Изд-во МАИ, 2017. 196 с.

14. **Efremov A.V.** Pilot behavior modeling and its application to manual control tasks / A.V. Efremov, M.S. Tjaglik, U.V. Tiumentzev, T. Wenqian // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, no. 32. Pp. 159–164. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.207

15. **Штовба С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

16. **Grigorie L.** Fuzzy controllers, theory and applications. IntechOpen, 2011. 384 p. DOI: 10.5772/572

17. **Nicholas D.** Genetic fuzzy trees for intelligent control of unmanned combat aerial vehicles: Doctoral Thesis. College of Engineering and Applied Science University of Cincinnati, 2015. 152 p.

18. Верещиков Д.В. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика / Д.В. Верещиков, В.А. Волошин, Д.В. Васильев, С.С. Ивашков [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2018. № 99. 25 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91926> (дата обращения: 12.01.2022).

References

1. **Myshkin, L.V.** (2006). [*Prediction of aviation technics development: the theory and practice*]. Moscow: FIZMATLIT, 304 p. (in Russian)
2. **Robinson, T.** (2017). *Train virtual, fight easy*. Royal aeronautical society, no. 6 (44), pp. 16–19. Available at: <https://www.aerosociety.com/news/train-virtual-fight-easy> (accessed: 12.01.2022).
3. **Heinemann, S., Müller, H.A. & Suleman, A.** (2018). *Toward smarter autoflight control system infrastructure*. Journal of Aerospace Information Systems, vol. 15, no. 6, pp. 353–365. DOI: 10.2514/1.I010565 (accessed: 12.01.2022).
4. **Bizin, G.A., Tikhonov, V.N. & Toropov, V.A.** (2013). [*Performance definition of stability and airplanes controllability in flight trials: monography*]. Volgograd: Izdatelstvo VolGU, 410 p. (in Russian)
5. **Levitsky, S.V. & Sviridov, N.A.** (2008). [*Flight dynamics: a textbook for technical universities*], in Levitsky S.V. (Ed.). Moscow: Izdatelstvo VVIA im. N.Ye. Zhukovskogo, 526 p. (in Russian)
6. **Ikryannikov, E.D., Iskuo, A.S., Levitsky, S.V. et al.** (2015). [*Yak-130UBS aircraft. Aerodynamics and flight characteristics*], in Podobedov V.A., Popovich K.F. (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 346 p. (in Russian)
7. **Vereshchagin, Y.O., Kostin, P.S., Podkuiko, T.A. & Vereschikov, D.V.** (2011). *Application of seminatural modelling for research of flight characteristics of planes on chair of aviation complexes and a design of flying machines*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, vol. 7, no. 11-2, pp. 12–14. (in Russian)
8. **Kostin, P.S., Vereshchagin, Y.O. & Voloshin, V.A.** (2015). *Programmno-modelling complex for seminatural modeling of dynamics of the maneuverable plane*. Trudy MAI, no. 81, 30 p. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57735> (accessed: 17.06.2021). (in Russian)
9. **Beylin, V.P. & Naralnikov, M.K.** (2015). [*Spatial model of the airplane flight with manual automated control*]. Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati N.Ye. Zhukovskogo, no. 3, pp. 85–89. (in Russian)
10. **Zhuravsky, K.A. & Filatov, V.K.** (2020). [*Model creation of dynamic and direct airplane movement in Matlab@Simulink modeling program complex*]. Gagarinskiye chteniya – 2020: sbornik tezisov dokladov XLVI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Moscow: MAI, p. 117. (in Russian)
11. **Vereshchikov, D.V., Razuvaev, D.V. & Kostin, P.S.** (2016). [*Applied computer science: Matlab@Simulink application for the decision of practical problems: Tutorial*]. Voronezh: VUNTS VVS «VVA», 104 p. (in Russian)
12. **Zhuravsky, K.A., Kostin, P.S. & Filatov, V.K.** (2021). [*Defining parameters of a safe maintenance condition for maneuverable plane performing a turn*]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2021663754. Registration's date: August 23. (in Russian)
13. **Efremov, A.V.** (2017). [*Plane – pilot system. Patterns and mathematical modeling of pilot behavior: Monography*]. Moscow: Izdatelstvo MAI, 196 p. (in Russian)
14. **Efremov, A.V., Tjaglik, M.S., Tiumentzev, U.V. & Wenqian, T.** (2016). *Pilot behavior modeling and its application to manual control tasks*. IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 32, pp. 159–164. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.207
15. **Shtovba, S.D.** (2007). [*Designing fuzzy systems using MATLAB*]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 288 p. (in Russian)

16. Grigorie, L. (2011). *Fuzzy controllers, theory and applications*. IntechOpen, 384 p. DOI: 10.5772/572

17. Nicholas, D. (2015). *Genetic fuzzy trees for intelligent control of unmanned combat aerial vehicles: Doctoral Thesis*. College of Engineering and Applied Science University of Cincinnati, 152 p.

18. Vereshchikov, D.V., Voloshin, V.A., Vasil'ev, D.V. & Ivashkov, S.S. (2018). *Applying fuzzy logic for developing simulation model of pilot's control actions*. Trudy MAI, no. 99, 25 p. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91926> (accessed: 17.06.2021). (in Russian)

Сведения об авторах

Журавский Константин Александрович, адъюнкт кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов ВУНЦ ВВС «ВВА», 05061993ghka@mail.ru.

Костин Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов ВУНЦ ВВС «ВВА», texnnik@mail.ru.

Information about the authors

Konstantin A. Zhuravsky, Postgraduate of the Military College, The Aviation Complexes and Aircraft Design Chair, Air Force Education and Research Center “The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy”, 05061993ghka@mail.ru.

Pavel S. Kostin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aviation Complexes and Aircraft Design Chair, Air Force Education and Research Center “The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy”, texnnik@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.06.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 14.06.2022
Accepted for publication 24.11.2022

ББК 05
Н 34
Св. план 2022

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 25, № 06, 2022
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 25, No. 06, 2022

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 24.11.2022.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

11,5 усл. печ. л.

Заказ № 945/174

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2022